



Ossi Komulainen

PILARIANTURAN RAKENNETEKNINEN MITOITUSPOHJA EU- ROKOODIN MUKAAN

PILARIANTURAN RAKENNETEKNINEN MITOITUSPOHJA EU- ROKOODIN MUKAAN

Ossi Komulainen
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Rakennesuunnittelu

Tekijä(t): Ossi Komulainen
Opinnäytetyön nimi: Pilarianturan rakennetekninen mitoituspohja Eurokoodin mukaan
Työn ohjaaja(t): Pekka Nykyri
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015 Sivumäärä: 48 + 23 liitettä

Virallisesti voimassa olevan standardin SFS-EN 1992-1-1 kansallisessa liitteessä sanotaan, että lävistysmitoitusta ei tehdä Suomessa toistaiseksi kyseisen standardin mukaan. Standardin lävistysmitoituksessa on huomattu ristiriitaisuuksia koetuloksiin nähden. Standardin mitoituksella saatavat kapasiteetit ovat tietyissä tapauksissa epävarmalla puolella. Tässä työssä lävistysmitoitusta käsiteltiin kansallisen liitteen luonnoksen 2014 mukaan. Siinä voimassa olevan standardin puutteita on pyritty korjaamaan.

Työn tavoitteena oli tehdä toimiva laskentapohja pilarianturan mitoitukselle MathCad-ohjelmalla. Laskentapohja laskee tarvittavan taivutusraudoitusmäärän, tarkistaa taivutusraudoituksen ankkuroinnin ja laskee käyttöasteen lävistyskestävyydelle.

Aluksi työssä perehdyttiin lävistysilmiöön ja lävistysmitoitukseen pilarilaatoissa sekä pilarianturoissa. Tämän jälkeen käsiteltiin laskentapohjan käyttöä, erityisesti tarkasteltiin tarvittavien lähtötietojen syöttöä ja niiden rajoituksia sekä laskentaprosessia ja tuloksia. Työssä keskityttiin ainoastaan rakennetekniseen mitoitukseen.

Opinnäytetyössä laadittiin laskentapohja, jota voidaan käyttää vanhan pilarianturan kestävyysanalysointiin, uuden pilarianturan raudoituksen mitoitukseen sekä kuormituksen ja mittojen muutoksen vaikutuksen arviointiin. Kaikki pohjan laskelmat ja rajaukset jätettiin näkyviin. Näin voidaan paremmin seurata laskelmia ja arvioida laskentapohjan toimintaa. Tulevaisuudessa laskentapohjaa on helppo muokata tai kehittää eteenpäin, koska kaikki kaavat ovat näkyvillä.

Asiasanat: Pilariantura, Lävistys, Mitoitus, Laskentapohja

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Structural Engineering

Author: Ossi Komulainen

Title of thesis: Calculation Template for Technical Dimensioning of Column
Base Structure According to Eurocode

Supervisor(s): Pekka Nykyri

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2015

Pages: 48 + 23 appendices

In Finland punching designing is not currently made according to the standard SFS-EN 1992-1-1. In the punching designing of the standard, contradictions have been noticed compared to test results. The capacities which are obtained with the designing of the standard are unreliable in certain cases. In this study the punching designing was dealt with new sketch of Finnish national annex. In the sketch an attempt has been made to correct the lacks of the standard.

The aim of this study was to make a functional calculation template to the designing of the column base with MathCad. The calculation template calculates bending reinforcement, it checks the anchorage of the bending reinforcement and calculates the utilization rate to the punching resistance.

The first section of this thesis handles theory of punching phenomenon and punching designing in column plates and column bases. The second section handles use of the calculation template which contains the feeding of start information and their restrictions, calculation process and results. In the work it was concentrated only on the structure technical designing.

In the thesis a calculation template was drawn up. The program can be used when analyzing load carrying capacity for existing bases, designing the reinforcement for new column bases and effects when load or some dimensions are changed. All the calculations and delimitations of the program were left on display. This way calculations could be better followed and the operation of the calculation program could be estimated. In the future the calculation template could be easily edited or could be developed further, because all the formulas are in sight.

Keywords: Column base, Bunching, Dimensioning, Calculation template

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
MERKKIEN SELITYKSET	7
1 JOHDANTO	10
2 LÄVISTYSMURTUMINEN	11
2.1 Laattojen lävistysilmiö	11
2.2 Pilarianturan lävistysilmiö	13
3 LÄVISTYSMITOITUS EC2:N MUKAAN	14
3.1 Laattojen lävistysmitoitus	14
3.1.1 Tarkistuspiirit	14
3.1.2 Mitoitusehdot	15
3.1.3 Mitoitusjännitys	16
3.1.4 Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys	18
3.1.5 Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys	20
3.2 Pilarianturan lävistysmitoitus	22
3.2.1 Lävistyskartio	22
3.2.2 Mitoitusehto	23
3.2.3 Lävistyskuorma ja mitoitusjännitys	24
3.2.4 Pilarianturan lävistyskestävyys	26
4 PILARIANTURAN LASKENTAPOHJA	28
4.1 Laskentapohjan toimintaperiaate	28
4.2 Laskentapohjan lähtöarvot	29
4.2.1 Mitat	29
4.2.2 Materiaalit	30
4.2.3 Kuormat	31
4.3 Laskentapohjan kulku	32
4.3.1 Lujuudet	32
4.3.2 Betonipeite	33
4.3.3 Tehollinen korkeus	34
4.3.4 Kuormitus	35

4.3.5 Taivutusmitoitus	35
4.3.6 Ankkurointi	40
4.3.7 Lävistysmitoitus	42
5 POHDINTA	47
LÄHTEET	48
LIITE 1 Esimerkkilaskelma mitoituspohjalla	

MERKKIEN SELITYKSET

A_T	anturan kuormitettu pinta-ala
A_{eff}	lävistyskartion ulkopuolelle jäävä anturan pinta-ala
$A_{s,min}$	vähimmäisraudoitusala
$A_{s,tot}$	vähimmäistankomäärällä toteutuva raudoitusmäärä
$A_{s,vaadittu}$	vaadittu raudoitusala
A_{s1}	yhden tangon pinta-ala
A_{sw}	pilaria ympäröivän yksittäisen leikkausraudoituskehän raudoituksen ala
$A_{sy,tot}$	valitulla tankomäärällä toteutuva raudoitusala
A_{sy}	y-suunnan raudoituksen pinta-ala
A_{sz}	z-suunnan raudoituksen pinta-ala
B_1	anturan sivun mitta y-akselin suunnassa
B_{1T}	anturan tehollinen sivun mitta y-akselin suunnassa
B_2	anturan sivun mitta z-akselin suunnassa
B_{2T}	anturan tehollinen sivun mitta z-akselin suunnassa
$C_{Rd,c}$	lävistyskestävyyden määrittämisessä käytettävä suure
D	pyöreään pilarin halkaisija tai suorakaidepilarin sivumittojen neliöjuuri
$F_{bd,y}$	toteutuva ankkuroituva vetovoima
$F_{sy,vaad}$	vaadittu ankkuroituva vetovoima
$L_{bd,rqd}$	ankkurointipituuden perusarvo
L_{by}	toteutuva ankkurointipituus
M_{Ed}	epäkeskisen kuorman aiheuttama taivutusmomentti
M_{Edy}	taivutusmomentti y-akselin suhteen
M_{Edz}	taivutusmomentti z-akselin suhteen
$S_{maks,slab}$	maksimi tankoväli
$V_{Ed,red}$	lävistyskuorma
V_{Ed}	vaikuttava leikkausvoima
W_1	pilarin pään momentin aiheuttaman leikkausjännityksen jakautuma
a_1	momenttia aiheuttavan ulokkeen pituus y-suunnassa
a_{12}	momenttia aiheuttavan lyhyemmän ulokkeen pituus y-suunnassa

a_2	momenttia aiheuttavan ulokkeen pituus z-suunnassa
a_{crit}	kriittisen murtokartion suhdeluku
a	lävistyskartion mitta
c_1	kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta
c_2	pilarin sivumitta toisessa suunnassa
$c_{min,b}$	tartuntavaatimuksista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo
$c_{min,dur}$	ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo
c_{min}	betonipeitteen vähimmäisarvo
c_{nom}	betonipeite
d	laatan tehollinen korkeus
d_x	x-suuntaisten tankojen tehollinen korkeus
d_y	y-suuntaisten tankojen tehollinen korkeus
e_y	kuormituksen epäkeskisyyys y-suunnassa
e_z	kuormituksen epäkeskisyyys z-suunnassa
f_{ck}	betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
f_{bd}	raudoitustankojen tartuntalujuuden mitoitusarvo
f_{cd}	betonin puristuslujuus
f_{cm}	betonin lieriölujuuden keskiarvo
f_{ctd}	betonin vetolujuus
f_{ctm}	betonin keskimääräinen vetolujuus
f_{yd}	betoniteräksen myötölujuus
f_{yk}	betoniteräksen vetolujuus
$f_{ywd,ef}$	lävistysraudoituksen tehollinen mitoituslujuus
f_{ywd}	leikkausraudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo
k	laatan paksuudesta riippuva kerroin
k_y	tankoväli
n_s	vähimmäistankomäärä
s_r	leikkausraudoituskehien säteittäinen väli
u	lävistyskartion piiri
u_0	pilarin ulkoreunanpiiri
u_1	perustarkistuspiiri
u_i	tarkasteltavan piirin pituus

$u_{out,ef}$	lisätarkistuspiirin pituus
u_{out}	lisätarkistuspiiri
v_{Ed}	leikkausjännitys
$v_{Rd,c}$	lävistyskestävyys
$v_{Rd,max}$	lävistyskestävyyden maksimiarvo
ρ_L	pääraudoituksen raudoitussuhde
ρ_{Ly}	raudoitussuhde y-suunnassa
ρ_{Lz}	raudoitussuhde z-suunnassa
Δc_{dev}	suunnittelussa huomioon otettava mittapoikkeama
$\eta_{2,y}$	järeiden tankojen tartunnan pienennys kerroin
α	leikkausraudoituksen ja laatan tason välinen kulma
α_{cc}	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät
β_{bd}	raudoituksen myötöä vastaava puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus
γ_c	betonin materiaaliosavarmuusluku
γ_s	teräksen materiaaliosavarmuusluku
ε_{cu}	betonin murtopuristuma
ε_{yd}	raudoituksen myötövenymä
σ_{qd}	pohjapaine
$\sigma_{sd,y}$	tangoissa vaikuttava normaalijännitys
η	jännityssuorakaiteen tehollisen korkeuden kerroin
λ	jännityssuorakaiteen tehollisen korkeuden kerroin
β	epäkeskisen kuorman huomioiva kerroin
μ	suhteellinen momentti
ω	mekaaninen raudoitussuhde

1 JOHDANTO

Uusien suunnitteluohjeiden eli Eurokoodien tulo on tuonut paljon muutoksia rakenteiden suunnitteluun. Vanhoihin suunnitteluohjeisiin perustuvat laskenta ja ohjeet ovat siis vanhentuneet. Eurokoodien mitoituksissa on kuitenkin havaittu virheitä ja ristiriitaisuuksia mm. koetuloksiin nähden. Tästä johtuen joitakin vanhoja suunnitteluohjeita käytetään edelleen ja eurokoodeja yritetään kehittää täsmällisemmiksi. Tässä työssä eurokoodin lävistysmitoituksen puutteita pyritään korjaamaan kansallisen liitteen luonnoksen 2014 mukaan.

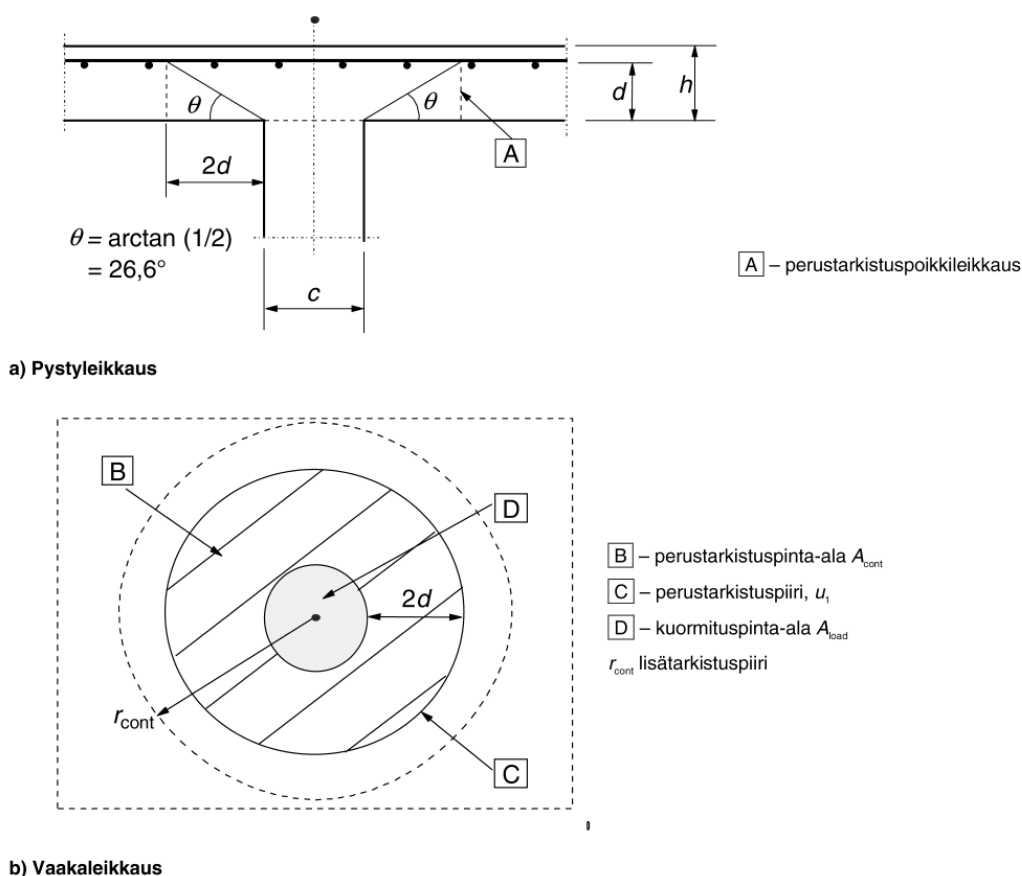
Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on toteuttaa laskentapohja, joka laskee, kestääkö suorakaiteen muotoinen pilariantura lävistysrasituksen ainoastaan syöttämällä määrättyjä arvoja laskentapohjaan. Aluksi laskentapohjaan tulee syöttää mm. palkin ja pilarin mitat, kuormitukset ja muutamia muita laskentaan liittyviä arvoja. Alkuarvojen syöttämisen jälkeen laskentapohja mitoittaa tarvittavan raudoituksen. Seuraavaksi laskentapohja laskee lävistyskestävyyden ja käyttöasteen. Mikäli kestävyys ei riitä, laskentapohja ilmoittaa siitä ja tarvittavat korjaukset voidaan tehdä.

Työssä keskitytään tavalliseen maanvaraiseen pilarianturaan, joka on rakennettu kitkamaan varaan ja voi kuormittua epäkeskeisesti vaakavoiman johdosta. Kokonaisuudessaan pilarianturan mitoitus on laaja, joten tarkastelussa syvenytään vain rakennetekniseen mitoitukseen ja geotekninen mitoitus jätetään työn ulkopuolelle. Kuormien mitoitus, painumat ja kantokestävyydet täytyy siis tarkastella erikseen.

Pilarianturan mitoitus on erittäin laaja kokonaisuus ja siihen liittyy paljon teoreettista taustatietoa. Laskentapohja onkin pyritty tekemään mahdollisimman yksinkertaiseksi ja selkeäksi, jotta sen käyttö olisi mielekästä. Työ on tehty Oulun ammattikorkeakoululle.

2 LÄVISTYSMURTUMINEN

Lävistysmurtuminen tarkoittaa sitä, että laattarakenteissa pienellä alalla vaikuttavan kuorman (pistekuorman) ympäristössä tapahtuu paikallista murtumista. Lävistysmurtumassa laatasta leikkautuu betonikartio irti ja laatta menettää kantavuutensa. Lävistysmurtumia voi syntyä pilarilaatoissa pilarin pään ympärillä, laatasta pistekuorman ympäristössä ja pilarianturassa. (1, s. 288; 2, s. 64.) Kuvassa 1 esitetään murtorajatilassa tapahtuvan lävistysmurtumisen tarkastelumalli.

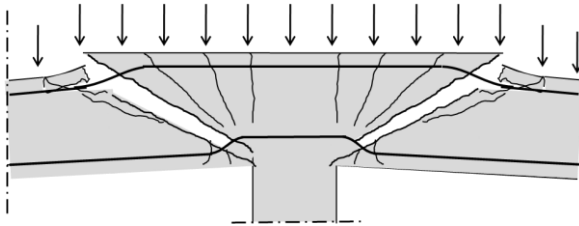


KUVA 1. Lävistysmurtumisen tarkastelumalli murtorajatilassa (3, s. 96)

2.1 Laattojen lävistysilmiö

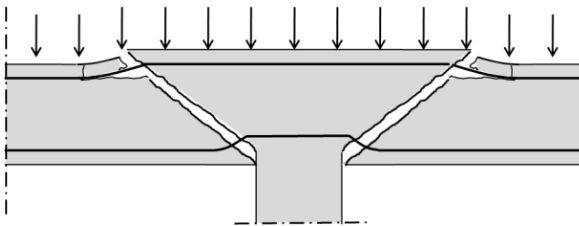
Pilarilaatoissa tapahtuva lävistysmurtuminen etenee tyypillisesti taivutushalkeamista, joita syntyy ensin pilarin juureen. Yläpinnan taivutusraudoituksen vaikutuksesta syntyy lisää taivutushalkeamia noin 1d - 2d etäisyydelle pilarin kyl-

jestä, raudoituksesta riippuen. Nämä halkeamat kaareutuvat kohti pilarin ja laatan alapintaan syntyvää puristusvyöhykettä muodostaen ”lävistyskartion”. Lopullinen murtuminen tapahtuu laatan alapinnassa puristusvyöhykkeen murtumana pilarin ja laatan liittymäkohdassa (kuva 2). Lävistyskuorma riippuu tässä mekaniismissa pilarin poikkileikkausmittojen ja laatan paksuuden suhteesta sekä taivutusraudoituksen määrästä. (1, s. 288; 2, s. 64.)



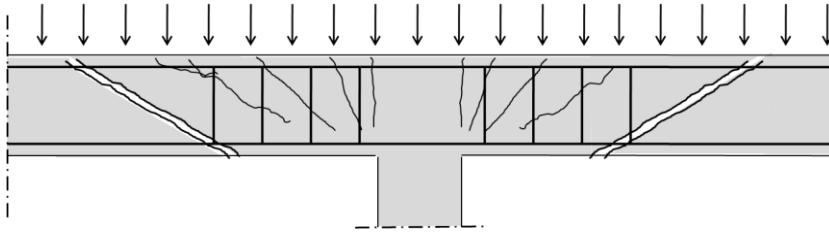
KUVA 2. Lävistysmurtuminen taivutushalkeilun jälkeen (2, s. 65)

Paksuilla, jäykillä laatoilla lävistysmurtuma syntyy äkillisesti ilman edeltävää taivutushalkeilua. Pilarin ympäristössä leikkausrasituksen aiheuttama päävetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, mikä johtaa murtokartion muodostumiseen (kuva 3). Tällainen murtotapa on massiivilaatoilla harvinainen, mutta saattaa olla määräävä murtomekanismi esimerkiksi pilarianturoissa ja ripalaattojen laipoissa pistekuormien vaikutuksesta. (1, s. 288; 2, s. 64.)



KUVA 3. Lävistysmurtuminen ilman taivutushalkeilua (2, s. 65)

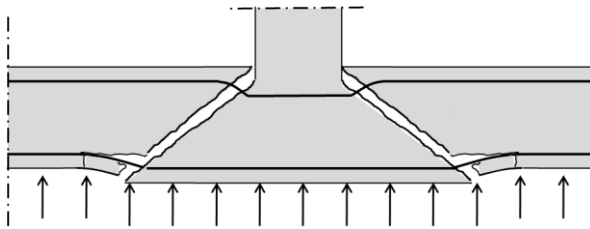
Laatat pyritään tavallisesti tekemään leikkausraudoittamattomana, mutta lävistyskestävyyttä voidaan korottaa leikkausraudoituksen avulla tarvittaessa. Leikkausraudoitetussa laatassa murtokartio siirtyy kauemmaksi pilarista. (Kuva 4.) (2, s. 64.)



KUVA 4. Lävistysmurtuminen leikkausraudoituksen kanssa (2, s. 65)

2.2 Pilarianturan lävistysilmiö

Pilariantura on paksu, jäykkä laatta, mistä johtuen lävistysmurtuma syntyy yleensä äkillisesti ilman edeltävää taivutushalkeilua. Pilarin ympäristössä leikkaurasituksen aiheuttama päävetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, mikä johtaa murtokartion muodostumiseen. Lävistyskartion kaltevuuskulma pilarianturoilla saattaa olla selvästi pienempi kuin pilarilaatoilla ja lävistyskuorma aiheutuu pohjapaineesta. (Kuva 5.) (1, s. 288; 2, s. 64.)



KUVA 5. Lävistysmurtuminen pilarianturassa (2, s. 65)

3 LÄVISTYSMITOITUS EC2:N MUKAAN

Virallisesti voimassa olevassa EC2:n kansallisessa liitteessä sanotaan, että lävistysmitoitusta ei tehdä Suomessa toistaiseksi standardin EN 1992-1-1 mukaan, koska mitoituksessa on huomattu ristiriitaisuuksia koetuloksiin nähden. Standardin mukaan laskettaessa kapasiteetit ovat tietyissä tilanteissa epävarmalla puolella. (4, s.7.) Tässä työssä lävistysmitoitusta käsitellään kansallisen liitteen luonnoksen 2014 mukaan, jossa voimassa olevan EC2:n puutteita on pyritty korjaamaan.

3.1 Laattojen lävistysmitoitus

3.1.1 Tarkistuspiirit

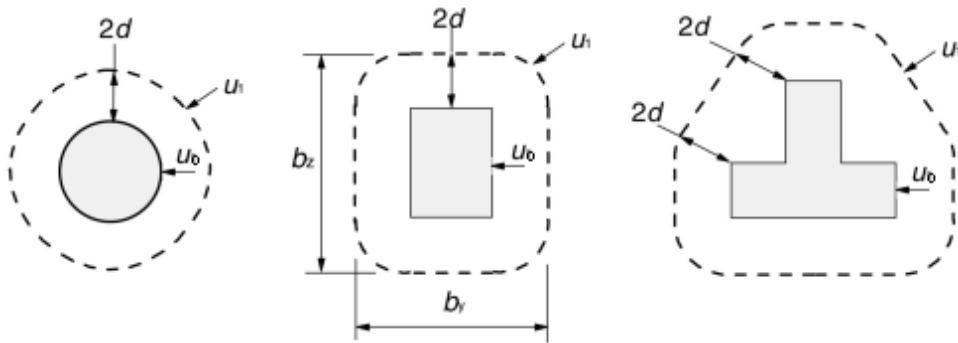
Lävistysmitoitus tehdään ns. tarkistuspiireillä. Tarkistuspiirit ovat pilarin ympärillä olevia pilarin muotoja myötäileviä piirejä. (3, s. 96–97.) Tarkistuspiirejä ovat

- perustarkistuspiiri u_1
- pilarin ulkoreunanpiiri u_0
- lisätarkistuspiiri u_{out} .

Perustarkistuspiiri u_1 sijaitsee normaalissa tilanteessa 2,0 d:n etäisyydellä kuormitetun alan reunasta ja on pituudeltaan mahdollisimman lyhyt (kuva 6). Vahvistetuilla laatoilla perustarkistuspiiri määritellään tapauskohtaisesti eurokoodin kohdassa 6.4.3. (3, s. 96–99.)

Pilarin ulkoreunanpiiri u_0 on sisäpilarissa sekä pilarianturoilla pilarin ulkoreunan piiri (kuva 6). Reuna- sekä nurkkapilareissa ulkoreunanpiiri u_0 ei kata koko ulkoreunaa, vaan määritellään tapauskohtaisesti. (3, s. 99.)

Lisätarkistuspiiri u_{out} määritetään, mikäli laattaan tarvitaan leikkausraudoitusta (3, s. 105).



KUVA 6. Tyypillisiä perustarkistuspiirejä ja ulkoreunapiirejä (3, s. 97)

Perustarkistuspiiri määritellään käyttämällä laatan tehollista korkeutta. Laatan paksuuden oletetaan olevan vakio (kaava 1.) (3, s.96.)

$$d = d_{eff} = \frac{d_y + d_x}{2}$$

KAAVA 1

d_y = y-suuntaisten tankojen tehollinen korkeus

d_x = x-suuntaisten tankojen tehollinen korkeus

3.1.2 Mitoitusehdot

Leikkausraudoittamattoman laatan perustarkistuspiirillä tarkistetaan, onko leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys $v_{Rd,c}$ suurempi tai yhtä suuri kuin piirille laskettu leikkausjännitys v_{Ed} (Kaava 2). (2, s. 66; 3, s. 99).

$$v_{Rd,c} \geq v_{Ed}$$

KAAVA 2

Mikäli leikkausjännitys V_{Ed} ylittää perustarkistuspiirillä lävistyskestävyyden $V_{Rd,c}$ arvon, täytyy laattaan mitoittaa ja asentaa leikkausraudoitus. Leikkausraudoituksen ulottuman selvittämiseksi määritetään lisätarkistuspiiri. Lisätarkistuspiirin sijoitetaan niin suurelle etäisyydelle, että sille laskettu jännitys ei ylitä lävistyskestävyyttä eli kaavan 2 ehto toteutuu. Tästä johtuen leikkausraudoitusta ei enää tarvita lisätarkistuspiirillä eikä sen ulkopuolella (2, s. 66; 3, s. 104-105.)

Seuraavaksi tarkistetaan pilarin piirillä tai kuormituspinna-alan piirillä, onko lävistyskestävyyden maksimiarvo $v_{Rd,max}$ suurempi tai yhtä suuri kuin piirille laskettu leikkausjännitys v_{Ed} (Kaava 3). (2, s. 66; 3, s. 99).

$$v_{Rd,max} \geq v_{Ed}$$

KAAVA 3

Suomen kansallisen liitteen luonnoksessa 2014 maksimilävistyskestävyyden määrittely poikkeaa virallisesti käytössä olevan eurokoodin suosituksesta. Se käydään läpi myöhemmin luvussa 3.1.5 Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys.

3.1.3 Mitoitusjännitys

Mitoitusjännitys on kokonaiskuorman v_{Ed} aiheuttama suurin leikkausjännitys tarkistuspiirillä (3, s.100). Se lasketaan kaavalla 4.

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{d u_i}$$

KAAVA 4

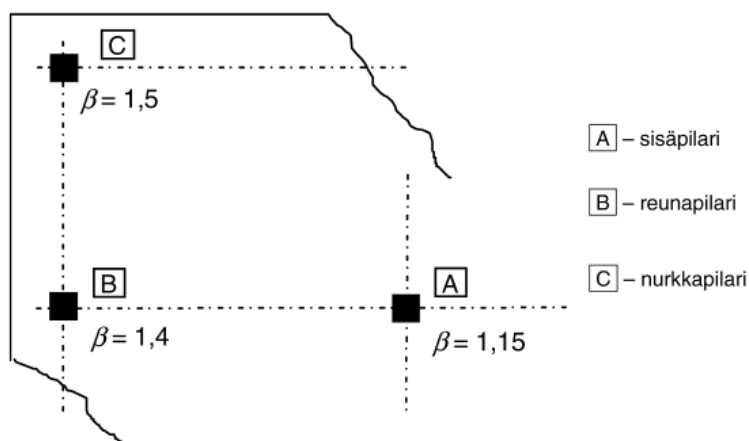
V_{Ed} = vaikuttava leikkausvoima

d = laatan tehollinen korkeus

u_i = tarkasteltavan piirin pituus

β = epäkeskisen kuorman huomioiva kerroin, keskiselle kuormalle $\beta = 1,0$

Rakenteissa, joiden stabiilius ei riipu laattojen ja pilareiden välisestä kehävaikutuksesta ja joissa laatan jänteiden pituus ei eroa toisistaan enempää kuin 25 %, voidaan kertoimelle β käyttää likimääräisiä suositusarvoja. Suositusarvot on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Kertoimen β suositusarvot (3, s. 102)

Yleisessä tapauksessa β lasketaan kaavasta 5.

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed} u_1}{V_{Ed} W_1}$$

KAAVA 5

k = kerroin, joka riippuu pilarin sivumittojen c_1 ja c_2 suhteesta (taulukko 1)

M_{Ed} = epäkeskisen kuorman aiheuttama taivutusmomentti

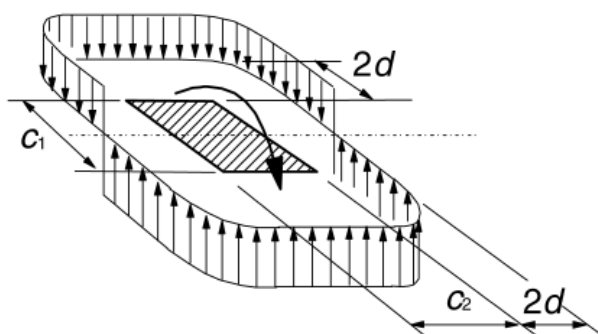
V_{Ed} = vaikuttava leikkausvoima

u_1 = perustarkistus piirin pituus

W_1 = pilarin pään momentin aiheuttaman leikkausjännityksen jakautuma (kuva 8)

c_1 / c_2	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80

TAULUKKO 1. Kertoimen k arvot suorakaiteen muotoisille kuormituspinta-aloille (3, s. 100)



KUVA 8. Pilarin pään momentin aiheuttaman leikkausjännityksen jakautuma sisäpilarin ja laatan liitoksessa (3, s. 100)

Pilarin pään momentin aiheuttaman leikkausjännityksen jakautuma W_1 lasketaan suorakaidepilarille kaavalla 6 (3, s.100).

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1 \quad \text{KAAVA 6}$$

c_1 = kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta

c_2 = pilarin sivumitta toisessa suunnassa

Muut tapaukset on esitetty eurokoodin luvussa 6.4.3 (3, s. 101–102).

3.1.4 Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys

Lävistyskestävyyden tarkistus tehdään perustarkistuspoikkileikkauksessa. Lävistyskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 7. (3, s.103.)

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k \left(100 \rho_L \frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{1/3} MPa \quad \text{KAAVA 7}$$

$C_{Rd,c}$ = lasketaan kansallisen liitteen luonnoksen 2014 mukaan kaavalla 8

k = laatan paksuudesta riippuva kerroin, joka lasketaan kaavalla 10

ρ_L = pääraudoituksen raudoitussuhde, lasketaan kaavalla 11

f_{ck} = betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

$$C_{Rdc} = \frac{0,3 \left(\frac{D}{d} + 1,5 \right)}{\gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4 \right)} \quad \text{KAAVA 8}$$

γ_c = betonin materiaaliosavarmuusluku

D = pyöreällä pilarilla pilarin halkaisija ja suorakaidepilarilla lasketaan kaavalla 9

$$D = \sqrt{c_1 c_2} \quad \text{KAAVA 9}$$

c_1 = kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta

c_2 = pilarin sivumitta toisessa suunnassa

$$k = \min \left\{ \sqrt{\frac{200}{d}}, 2,0 \right\} \quad \text{KAAVA 10}$$

$$\rho_L = \min \left\{ \sqrt{\rho_{Ly} \rho_{Lz}}, 0,02 \right\} \quad \text{KAAVA 11}$$

ρ_{Ly} = raudoitussuhde y-suunnassa lasketaan kaavalla 12

ρ_{Lz} = raudoitussuhde z-suunnassa lasketaan kaavalla 13

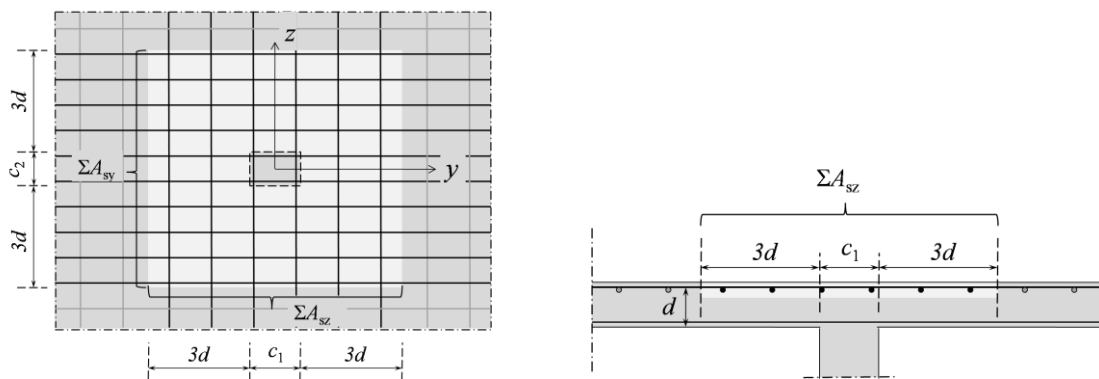
$$\rho_{Ly} = \frac{\Sigma A_{sy}}{d(6d+c_1)} \quad \text{KAAVA 12}$$

A_{sy} = y-suunnan raudoituksen pinta-ala

$$\rho_{Lz} = \frac{\Sigma A_{sz}}{d(6d+c_2)} \quad \text{KAAVA 13}$$

A_{sz} = z-suunnan raudoituksen pinta-ala

Raudoitussuhteet ρ_{Ly} ja ρ_{Lz} liittyvät y- ja z-suuntien ankkuroituihin vetoteräksiin. Ne lasketaan keskimääräisen raudoitusmäärä mukaan leveydeltä, joka on pilarin vivun mitta + 3d pilarin molemmilta puolilta (kuva 9). Raudoitusmääriin otetaan huomioon ainoastaan raudoitus, joka on täysin ankkuroitu tarkasteltavan poikkileikkauksen molemmin puolin. Lävistystapauksessa täysi ankkurointi on yleensä helppo toteuttaa. Muussa tapauksessa pääraudoituksen raudoitussuhde ρ_L lasketaan standardin SFS-EN 1992-1-1 luvun 6.2.2 mukaan. (2, s. 69-70; 3, s.103.)



KUVA 8. Raudoitussuhteiden määrittäminen pilarin päässä (2, s. 70)

Kansallisen liitteen luonnoksessa 2014 lävistyskestävyyden alaraja asetetaan nollassi. Tästä johtuen lävistyskestävyys vaatii aina taivutusraudoituksen ja mitoitus tehdään kaavan 7 mukaan (5, s.7.)

3.1.5 Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys

Mikäli leikkausjännitys V_{Ed} ylittää perustarkistuspiirillä lävistyskestävyyden $V_{Rd,c}$ arvon, täytyy laattaan mitoittaa ja asentaa leikkausraudoitus. Leikkausraudoituksen määrä mitoitetaan kaavalla 14. (3, s.104-105.)

$$v_{Rd,cs} = 0,167v_{Rd,c} + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} f_{ywd,ef} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha \quad \text{KAAVA 14}$$

$v_{Rd,c}$ = lävistyskestävyyden mitoitusarvo

s_r = leikkausraudoituskehien säteittäinen väli

A_{sw} = pilaria ympäröivän yksittäisen leikkausraudoituskehän raudoituksen ala

$f_{ywd,ef}$ = lävistysraudoituksen tehollinen mitoituslujuus, lasketaan kaavalla 15

u_1 = perustarkistuspiirin pituus

α = leikkausraudoituksen ja laatan tason välinen kulma

s_r = leikkausraudoituskehien säteittäinen väli

$$f_{ywd,ef} = \min \left\{ \left(250 + 0,25 \frac{d}{mm} \right) MPa, f_{ywd} \right\} \quad \text{KAAVA 15}$$

f_{ywd} = leikkausraudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo

Kaava 14 on johdettu säteittäiselle raudoitukselle. Kaavan termi $1,5(d/s_r)A_{sw}$ voidaan korvata piirin u_1 rajaamalla alueella olevan raudoituksen kokonaispinta-alalla. (2, s. 71.)

Kaavan 14 kertoimessa 0,167 on otettu huomioon Suomen kansallisen liitteen luonnoksen 2014 valinta, jolla betonin osuus jaetaan luvulla 4,5 ($0,75/4,5 = 0,167$) (5, s.7).

Leikkausraudoitus sijoitetaan pilarin ulkoreunanpiiriin ja lisätarkistuspiiriin väliselle alueelle kuvan 9 mukaisesti (2, s. 72; 3, s.105). Lisätarkistuspiirin pituus lasketaan kaavalla 16.

$$u_{out,ef} = \beta \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c}d}$$

KAAVA 16

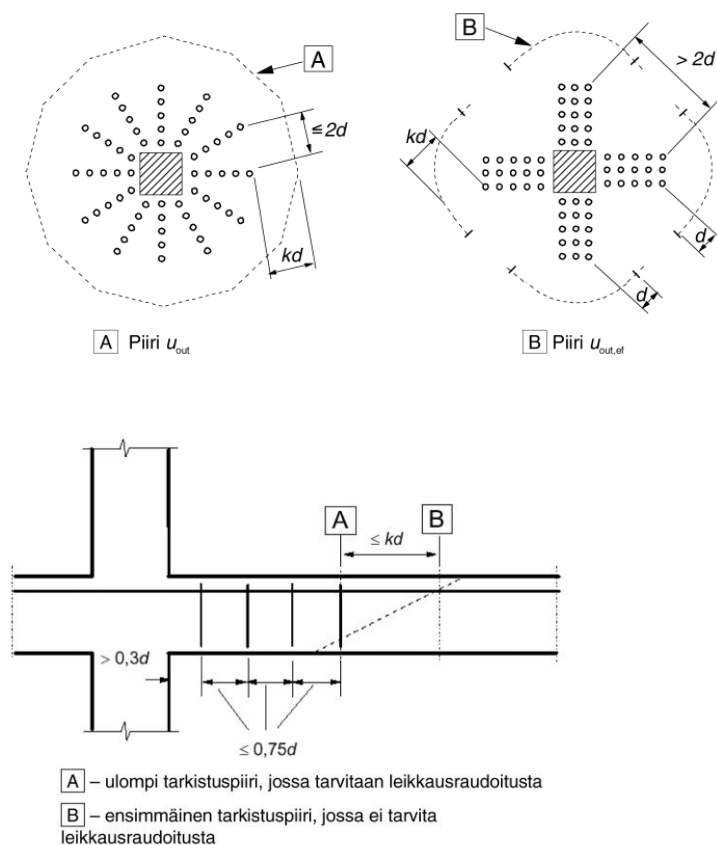
β = epäkeskisen kuorman huomioiva kerroin

V_{Ed} = vaikuttava leikkausvoima

$v_{Rd,c}$ = lävistyskestävyyden mitoitusarvo

d = laatan tehollinen korkeus

Leikkausraudoituksen uloin piiri sijoitetaan etäisyydelle, joka on enintään mitan $1,5d$ verran lisätarkistuspiirin sisäpuolella (3, s.105).



KUVA 9. Leikkausraudoituksen sijoittelu, $k=1,5$ (3, s. 105)

Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyyden yläraja umpihakoja ja alaspäin taivutettuja hakoja käytettäessä tarkistetaan kavalla 17 (5, s.8).

$$V_{Rd,max} = 1,6V_{Rd,c} = 1,6V_{Rd,c} \frac{u_1 d}{\beta} \quad \text{KAAVA 17}$$

$v_{Rd,c}$ = lävistyskestävyyden mitoitusarvo

β = epäkeskisen kuorman huomioiva kerroin

Tämä ehto voidaan esittää pilarin piirillä vaikuttavalle leikkausjännitykselle kavalla 18 (5, s.8).

$$V_{Rd,max} = 1,6V_{Rd,c} \frac{u_1}{u_0} \quad \text{KAAVA 18}$$

$v_{Rd,c}$ = lävistyskestävyyden mitoitusarvo

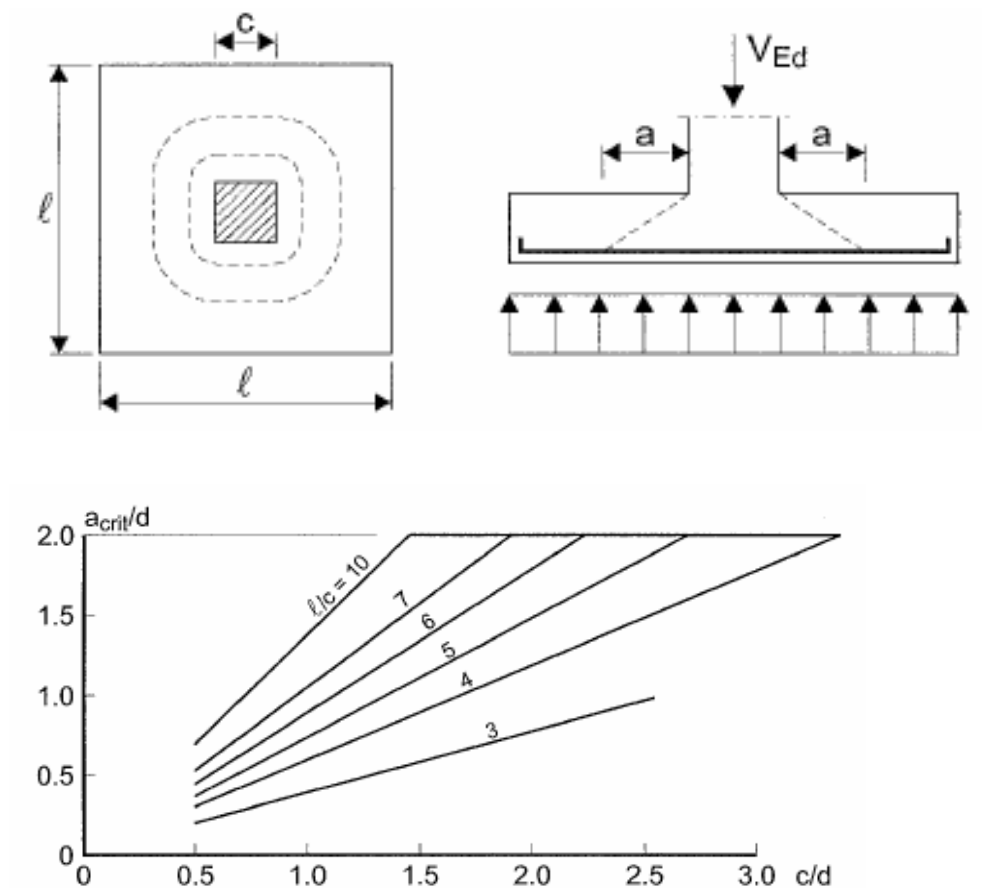
u_0 = pilarin ulkoreunan piiri

3.2 Pilarianturan lävistysmitoitus

Pilarianturan lävistysmitoitus poikkeaa pilarilaatan mitoituksesta siten, että lävistyskartion kaltevuus kulma pilarianturalle saattaa olla selvästi pienempi kuin Eurokoodissa pilarilaatoille määritetty $26,7^\circ$. Lävistyskuorma aiheutuu pohjapaineesta, jonka vaikuttava ala riippuu lävistyskartion piiristä. Jos lävistyskartion kulma olisi sama kuin pilarianturoilla, anturan paksuudesta johtuen pohjapaineen vaikuttavasta alasta vähennettäisiin liian iso alue, mikä pilarianturoilla johtaisi hyvin pieniin kuormiin. Tästä johtuen kriittinen lävistyskartion kulma on selvästi pienempi, mutta se pitäisi eurokoodin ohjeistuksen mukaan hakea keilemalla. (2, s. 194; 6, s. 6-32.)

3.2.1 Lävistyskartio

Eurokoodin tausta-aineistossa on esitetty käyrästä kriittisen lävistyskartion määrittämiseen keskeisesti kuormitetulle neliöanturalle (kuva 10). Käyrästä helpottaa laskentaa tavallisimmissa tapauksissa. (2, s. 194; 6, s. 6-32.)



KUVA 10. Apukäyrästä kriittisen lävistyskartion määrittämiseen neliöanturalle (6, s. 6-32)

Lävistyskartion piiri lasketaan kaavalla 19 (2, s. 195).

$$u = 2(c_1 + c_2)2\pi a$$

KAAVA 19

c_1 = kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta

c_2 = pilarin sivumitta toisessa suunnassa

a = lävistyskartion mitta, joka määritetään kuvan 10 mukaan

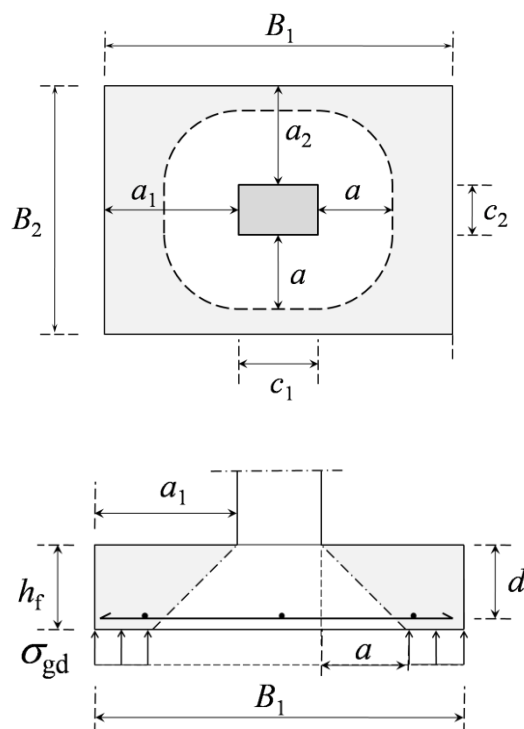
3.2.2 Mitoitusehto

Pilarianturan lävistyskartion piirillä tarkistetaan, onko anturan lävistyskestävyys $v_{Rd,c}$ suurempi tai yhtä suuri kuin piirille laskettu leikkausjännitys v_{Ed} . Ehto on siis sama kuin leikkausraudoittamattomalla laaatalla. (kaava 2). Mikäli ehto ei

toteudu, lävistyskestävyyttä voidaan parantaa lisäämällä taivutus- tai lävistysraudoitusta, parantamalla ankkurointia tai kasvattamalla anturan paksuutta. (2, s. 203.)

3.2.3 Lävistyskuorma ja mitoitusjännitys

Lävistyskuormaa aiheuttaa lävistyskartion ulkopuolelle jäävään anturan osaan kohdistuva pohjapaine. Kuorma riippuu siis lävistyskartion kaltevuudesta: mitä jyrkempi kartio on, sitä suurempi on lävistyskuorma. Kaltevuuden mittana mitoituskaavoissa käytetään kulman tangenttia d/a . (Kuva 11.) (2, s. 194; 6, s. 6-32.)



KUVA 11. Pilarianturan lävistysmurtokartio (2, s. 195)

Lävistyskuorma lasketaan kaavan 20 mukaan (2, s. 195).

$$V_{Ed,red} = A_{eff}\sigma_{gd}$$

KAAVA 20

A_{eff} = lävistyskartion ulkopuolelle jäävä anturan pinta-ala kuvan 11 mukaisilla merkinnoilla, joka lasketaan kaavalla 21

σ_{gd} = pohjapaine, joka lasketaan kaavalla 22

$$A_{eff} = B_1 B_2 - 2(c_1 + c_2)2\pi a^2 \quad \text{KAAVA 21}$$

B_1 = anturan sivun mitta y-akselin suunnassa

B_2 = anturan sivun mitta z-akselin suunnassa

c_1 = kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta

c_2 = pilarin sivumitta toisessa suunnassa

a = lävistyskartion mitta

$$\sigma_{qd} = \frac{V_{Ed}}{A_T} \quad \text{KAAVA 22}$$

V_{Ed} = vaikuttava leikkausvoima

A_T = anturan kuormitettu pinta-ala, joka lasketaan kaavalla 23

$$A_T = B_{1T} B_{2T} \quad \text{KAAVA 23}$$

B_{1T} = anturan tehollinen sivun mitta y-akselin suunnassa, joka lasketaan kaavalla 24

B_{2T} = anturan tehollinen sivun mitta z-akselin suunnassa, joka lasketaan kaavalla 25

$$B_{1T} = B_1 2e_y \quad \text{KAAVA 24}$$

e_y = kuormituksen epäkeskisyys y-suunnassa, joka lasketaan kaavalla 26

$$B_{2T} = B_2 2e_z \quad \text{KAAVA 25}$$

e_z = kuormituksen epäkeskisyys z-suunnassa, joka lasketaan kaavalla 27

$$e_y = \frac{M_{Edz}}{V_{Ed}} \quad \text{KAAVA 26}$$

M_{Edz} = taivutusmomentti z-akselin suhteen

$$e_z = \frac{M_{Edy}}{V_{Ed}} \quad \text{KAAVA 27}$$

M_{Edy} = taivutusmomentti y-akselin suhteen

Lävistyskuormien aiheuttama leikkausjännitys piirillä u lasketaan kaavalla 28.

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud} \quad \text{KAAVA 28}$$

$V_{Ed,red}$ = lävistyskuorma

u = lävistyskartion piiri

d = laatan tehollinen korkeus

Epäkeskisesti kuormitetulle pilarianturalle lasketaan leikkausjännitys kaavalla 29.

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud} \left(1 + k \frac{M_{Ed}u}{V_{Ed,red}W} \right) \quad \text{KAAVA 29}$$

k = kerroin, joka riippuu pilarin sivumittojen c_1 ja c_2 suhteesta (taulukko 1)

M_{Ed} = taivutusmomentti

W_1 = pilarin pään momentin aiheuttaman leikkausjännityksen jakautuma, joka lasketaan pilarianturoille kaavalla 30.

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1c_2 + 4c_2d + 16d^2 + 2\pi dc_1 \quad \text{KAAVA 30}$$

3.2.4 Pilarianturan lävistyskestävyys

Pilarianturoiden lävistyskestävyys lasketaan kaavalla 31, joka on muokattu lävistyskestävyyden peruskaavasta 7. Peruskaavaan on lisätty kerroin $2d/a$, joka ottaa huomioon kestävyiden riippuvuuden murtokartion kaltevuudesta. (2, s. 196.)

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k \left(100 \rho_L \frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{1/3} \frac{2d}{a} MPa$$

KAAVA 31

$C_{Rd,c}$ = lasketaan kansallisen liitteen luonnoksen 2014 mukaan kaavalla 8

k = lasketaan kaavalla 10

ρ_L = pääraudoituksen raudoitussuhde, lasketaan kaavalla 11

f_{ck} = betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

a = lävistyskartion mitta

4 PILARIANTURAN LASKENTAPOHJA

Tavoitteena oli tehdä MathCad-laskentapohja, joka laskee tarvittavan taivutusraudoitusmäärän pilarianturalle. Pohja tarkistaa taivutusraudoituksen ankkuroinnin ja laskee käyttöasteen lävistyskestävyydelle Eurokoodien ohjeiden mukaan. Laskentapohjan tekemisen yksi tärkeä tavoite oli myös se, että laskentaa pystyttäisiin seuramaan. Lisäksi tavoitteena oli tehdä laskentapohja, jossa pohjan käyttäjä päättää joitakin laskentapohjalle syötettäviä arvoja, vaikka ne voitaisiin määrätä valmiiksi. Tästä syystä käyttäjän tulee olla tietoinen, mitä lasketaan.

Opinnäytetyössä laadittu laskentapohja ei ole kovin pitkä, vaikka kaikki kaavat on syötetty erikseen ja ne on otsikoitu selvyyden vuoksi. Pohjaa olisi voitu lyhentää entisestään piilottamalla joitakin kaavoja, mutta kaikki kaavat ovat näkyvillä, jotta laskentapohjan käyttäjä näkee, mitä kaikkea pohjassa on otettu huomioon.

4.1 Laskentapohjan toimintaperiaate

Laskentapohjan toimintaperiaate perustuu Eurokoodien antamien rajausten mukaan muodostettuihin ehtoyhtälöihin. Laskentapohja on siis ohjeissa olevien kaavojen syöttämistä ja niiden keskinäisten ehtojen toteuttamista.

Mikäli ehtoyhtälön ehto ei täyty, laskentapohja ilmoittaa virheestä. Kuvassa 12 on esitetty ehtoyhtälöiden toimintaa. Vaikka jokin käyttö-aste menisi yli raja-arvon tai muu ehto ei täytyisi, laskentaa ei pysäytetä. Pohjaan tulee ilmoitus virheestä, kuten "VIRHE, RAUDOITUS EI MYÖDÄ". Laskentapohja täytyy siis käydä kokonaisuudessaan läpi, jotta jokainen kohta tulee tarkastettua.

$$\text{myötääkö}_{\text{raudoitus}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \beta \leq \beta_{bd} \\ \text{"VIRHE, RAUDOITUS EI MYÖDÄ"} & \text{if } \beta > \beta_{bd} \end{cases}$$

$\text{myötääkö}_{\text{raudoitus}} = \text{"OK"}$

KUVA 12. Ehtoyhtälö toimintamalli

Laskentapohjassa on neljänlaisia laatikoita, joihin suunnittelijan tulee kiinnittää huomiota. Keltaisiin laatikoihin tulee syöttää arvo tai niistä tulee valita oikea arvo. Valkoisista laatikoista nähdään laskujen vastausten lukuarvot. Punaisista laatikoista nähdään, onko laskennassa tapahtunut virhe vai voidaanko laskea jatkua. Vihreistä laatikoista nähdään käyttöaste. Kuvassa 13 on esimerkki neljästä erityyppisestä laatikosta.

-Anturan paksuus [mm]: 600

$v_{Ed} = 0.808 \text{ MPa}$

Toteutuuko $\text{ankkuroitava vetovoima} = \text{"OK"}$

$\text{KÄYTTÖASTE} := \frac{v_{Ed}}{v_{Rd,c}} = 1$

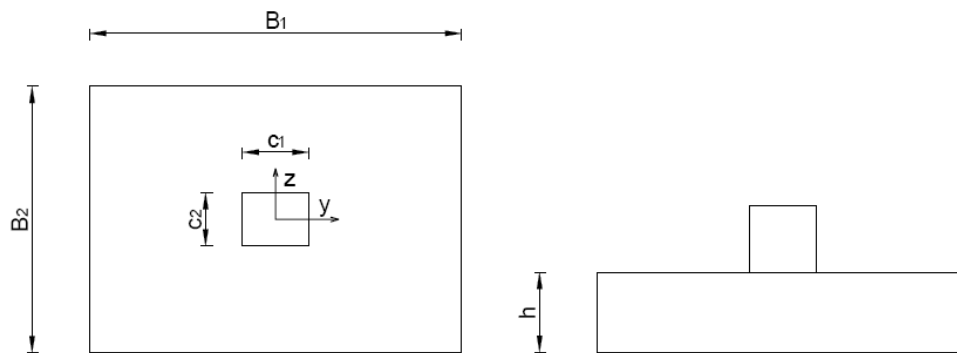
KUVA 13. Laskentapohjan kohdat, joihin tulee kiinnittää huomiota

4.2 Laskentapohjan lähtöarvot

Laskentapohjan alussa käyttäjän tulee antaa työkalulle tarvittavat tiedot mitoista, materiaaleista ja kuormituksista. Laskentapohjan edetessä käyttäjän pitää syöttää kyseiseen tapaukseen sopiva betonipeitteen mittapoikkeama, tehollinen korkeus, raudoitusten halkaisijat ja määrät.

4.2.1 Mitat

Laskentapohjassa keskitytään ainoastaan rakennetekniseen mitoitukseen. Laskentapohja ei siis määritä anturan mittoja, vaan ne täytyy valita geoteknisen mitoituksen perusteella tapauskohtaisesti. Laskentapohjassa anturalle annetaan valmiiksi määritetyt sivumitat kuvan 14 mukaisissa suunnissa sekä anturan alustava korkeus. Myös pilarin mitat mitoitetaan erillisen mitoituksen perusteella, koska pohjassa keskitytään ainoastaan anturan kestävyYTEEN. Pilarin mitat syötetään laskentapohjaan anturan mittojen alapuolelle (kuva 15).



KUVA 14. Anturan suunnat

-Anturan leveys (suunta y) [mm]:

2800

-Anturan leveys (suunta z) [mm]:

2000

-Anturan paksuus [mm]:

600

-Pilarin sivun mitta (y-suunta) [mm]:

500

-Pilarin sivun mitta (z-suunta) [mm]:

400

KUVA 15. Anturan ja pilarin mitat

4.2.2 Materiaalit

Käyttäjä valitsee alasvetovalikoista anturalle valittavat materiaalit ja materiaaleihin liittyvät ominaisuudet (kuva 16). Anturassa käytettävän betonin lujuusluokka on mahdollista valita väliltä C25/30-C90/105. Tällä valinnalla asetetaan käyttöön betonin mitoitusarvot.

Rasitusluokkaan käyttäjällä on mahdollisuus valita kahden karbonatisoitumiselle alttiin rasitusluokan väliltä. Rasitusluokat vaikuttavat betonipeitteen vähimmäisarvoon. XC1 valitaan silloin, kun antura on pysyvästi veden alla. XC2 on perustuksille yleisempi rasitusluokka ja valitaan silloin, kun antura on pitkään kosketuksissa veden kanssa.

Toleranssiluokan valinnat ovat 1-luokka ja 2-luokka. Toleranssiluokka vaikuttaa betonin ja teräksen materiaaliosavarmuuslukuihin. Normaalista mittatarkkuudesta-

soa käytettäessä valitaan 1-luokka ja tiukennettua mittatarkkuustasoa käytettäessä 2-luokka. Mikäli toleranssiluokaksi valitaan 2-luokka, täytyy valmistus tehdä toteutusluokassa 3.

Teräsluokista on mahdollisuus valita kuumavalssatuista hitsattavista harjateräksistä B500B tai B700A. Myös verkkoteräksen käyttö anturassa olisi mahdollista, mutta sitä ei tähän laskentapohjaan otettu mukaan.

Käyttöiän valinta mahdollisuudet ovat normaali 50 vuotta tai pidennettyä käyttöikää tarvittaessa 100 vuotta. Mikäli käyttöiäksi valitaan 100 vuotta ja rasitusluokka on XC2, betonipeitteen vähimmäisarvovaatimukseen tulee 5 mm lisää paksuutta. Betonipeitteen kasvaessa betoniterästen karbonatisoitumisesta johtuva korrosio hidastuu.

-Rasitusluokka:

XC2

-Toleranssiluokkaluokka:

2

-Rakenteen käyttöikä:

50 vuotta

-Betonin lujuusluokka:

C35/45

-Rauditus:

B500B

KUVA 16. Anturan materiaalit

4.2.3 Kuormat

Laskentapohja ei laske mitoittavia kuormia, vaan ne täytyy laskea valmiiksi pohjaa varten standardin SFS-EN 1990:n mukaisesti. Jos kuormaksi tulee ainoastaan pystykuormaa, kuormitus on keskeistä. Yleensä anturalle tulee myös momenttikuormaa ja kuormitus on tällöin epäkeskeistä. Laskentapohjassa on mahdollista antaa momenttikuormaa ainoastaan z-akselin ympäri (kuva 17).

-Mitoituskuorma, pysty [kN]:

2000

-Mitoituskuorma, momentti [kNm]:

500

KUVA 17. Anturan alapinnassa vaikuttavat kuormat

4.3 Laskentapohjan kulku

Laskentapohja on tarkoitettu pilarianturan lävistyskestävyyden määrittämiseen. Ennen lävistyskestävyyden määrittämistä pohja mitoittaa anturan taivutusraudoituksen ja taivutusraudoituksen ankkuroinnin. Luvuissa 4.3.1–4.3.7 käydään läpi laskentapohjan kulku vaiheittain.

4.3.1 Lujuudet

Laskentapohjan eteneminen vaatii useiden lujuuksien määrittämisen. Annettujen lähtötietojen perusteella pohja antaa automaattisesti oikeat arvot betonite-räksen vetolujuudelle sekä betonin lieriölujuudelle.

Betonin puristuslujuus määritetään kaavan 32 mukaan.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{KAAVA 32}$$

α_{cc} = kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pit-
käaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset teki-
jät

γ_c = betonin materiaaliosavarmuusluku

Betonin lieriölujuuden keskiarvo määritetään kaavan 33 mukaan.

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 33}$$

Betonin keskimääräinen vetolujuus määritetään kaavan 34 tai kaavan 35 mu-
kaan betonin lujuusluokasta riippuen.

$$f_{ctm} = 0,30 \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{2/3} \leq C50/60 \quad \text{KAAVA 34}$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \left(1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right) \right) > C50/60 \quad \text{KAAVA 35}$$

Betonin vetolujuus määritetään kaavan 36 mukaan.

$$f_{ctd} = 0,7 \frac{f_{ctm}}{\gamma_c}$$

KAAVA 36

Betoniteräksen myötölujuus määritetään kaavan 37 mukaan.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

KAAVA 37

f_{yk} = Betoniteräksen vetolujuus

γ_s = Teräksen osavarmuusluku

4.3.2 Betonipeite

Betonipeite suojaa anturan teräksiä korroosiolta. Betonipeitteen nimellisarvo määritetään kaavan 38 mukaan.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

KAAVA 38

c_{min} = Betonipeitteen vähimmäisarvo, määritetään kaavan 39 mukaan

Δc_{dev} = suunnittelussa huomioon otettava mittapoikkeama

Suunnittelussa huomioon otettava mittapoikkeama Δc_{dev} on tasauskerroksella varustettua pohjamaata vasten valettaessa 10 mm. Mittapoikkeama valettaessa suoraan maapohjaa vasten on 20–40 mm, suunnittelijan harkinnan perusteella. Mitoituspohjan käyttäjän tulee siis valita oman harkinnan mukaan mittapoikkeama (kuva 18).

-Suunnittelussa huomioon otettava
mitta poikkeama [mm]:
(EC2 1992-1-1 kansallinen liite kohta 4.4.1.3.)

40

KUVA 18. Huomioon otettava mittapoikkeama

$$c_{min} = maks(c_{min,dur}, c_{min,b}, 10mm)$$

KAAVA 39

$c_{min,dur}$ = Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo, määritetään taulukon 2 mukaan

$c_{min,b}$ = Tartuntavaatimuksesta johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo

Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvovaatimus $c_{min,dur}$ (mm)								
Kriteeri	Rasitusluokka taulukon 4.1 mukaan							
	X0	XC1	XC2	XC3, XC4	XD1	XS1	XD2	XD3 XS2, XS3
Betoniteräs	10	10	20	25	30	30	35	40
Jänneteräs	10	20	30	35	40	40	45	50
100 vuoden suunniteltu käyttöikä ¹⁾	+0	+0	+5	+5	+5	+5	+5	+5
Lujuusluokka \geq	C20/25	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45	C40/50	C35/45	C45/55
Toteutusluokka 3 ja toleranssiluokka 2	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
CE-merkityillä elementeillä pienennetyt poikkeamat								
HUOM. 1 Tartuntajänteille, joiden pitkäaikainen jännitys käyttörajatilassa on korkeintaan 400 N/mm ² , sovelletaan betoniteräkselle asetettuja vaatimuksia.								
HUOM. 2 Betonipeitteen vähimmäisarvovaatimukset koskevat myös jänneterästen ankkureita ja valuun asennettavia metalliosia ellei niitä ole korroosiosuojattu rasitusluokkaa vastaavasti.								

TAULUKKO 2. Betonipeitteen vähimmäisarvovaatimukset (4, s. 5)

Yksittäisillä tangoilla tartuntavaatimuksista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo $c_{min,b}$ on rauditus tangon halkaisija, jota varten mitoitus pohjan käyttäjän tulee olettaa tulevan raudituksen halkaisija (kuva 19).

-Oletetaan raudituksen halkaisija [mm]:

KUVA 19. Oletettu raudoitustankojen halkaisija

4.3.3 Tehollinen korkeus

Taivutetulla rakenteella tehollinen korkeus tarkoittaa etäisyyttä pääraudoituksen keskikohdasta puristettuun pintaan. Tässä kohtaa laskentapohjaa pystytään määrittämään alustava tehollinen korkeus oletetun raudituksen halkaisijan perusteella (kaava 40).

$$d = h - \frac{1,1\phi}{2} - c_{nom}$$

KAAVA 40

h = laatan korkeus

\emptyset = raudoituksen oletettu halkaisija

Valitaan teholliseksi korkeudeksi saatua d -mittaa pienempi mitta (kuva 20).

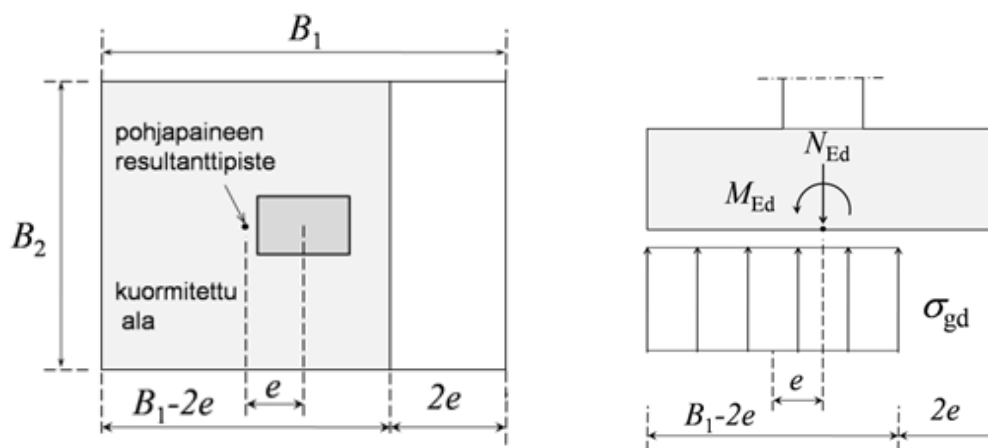
-Valitaan tehollinen korkeus
(valitaan pienempi mitta, kuin
laskettu d -mitta):

520

KUVA 20. Valittu tehollinen korkeus

4.3.4 Kuormitus

Anturan lävistyskuormituksen aiheuttaa pohjapaine, joka muodostuu anturalle tulevasta pystykuormasta sekä vaakakuorman aiheuttamasta momentista. Lävistyskuormaa ei muodostu koko anturan alalta, mikäli kuormitus on epäkeskeistä. Kuvassa 21 on esitetty pohjapaineen jakautuma epäkeskisellä kuormituksella. Pohjapaineen määrittämiseen tarvittavat kaavat 22–27 ovat esitetty teoriaosuudessa, joten niitä ei tässä esitetä uudestaan.



KUVA 21. Pohjapaineen jakauma epäkeskisellä kuormalla (2, s. 181)

4.3.5 Taivutusmitoitus

Taivutusmitoituksessa mitoitetaan anturan taivutettuun alapintaan tarvittavat raudoitukset.

Taivutusmomentit

Taivutusmitoituksen alussa määritetään taivutusmomentit molemmissa suunnissa. Taivutusmomentti anturan pidemmän sivun suunnassa lasketaan kaavalla 41 ja vastaavasti lyhyemmän sivun suunnassa kaavalla 42.

$$M_{Ed,y} = \sigma_{gd} \frac{a_1^2}{2} B_{2T} \quad \text{KAAVA 41}$$

σ_{gd} = pohjapaine

a_1 = momenttia aiheuttavan ulokkeen pituus y-suunnassa lasketaan kaavalla 43

B_{2T} = anturan tehollinen sivun mitta z-akselin suunnassa

$$M_{Ed,z} = \sigma_{gd} \frac{a_2^2}{2} B_{1T} \quad \text{KAAVA 42}$$

a_2 = momenttia aiheuttavan ulokkeen pituus z-suunnassa lasketaan kaavalla 44

B_{1T} = anturan tehollinen sivun mitta y-akselin suunnassa

$$a_1 = \frac{B_1 - c_1}{2} \quad \text{KAAVA 43}$$

$$a_2 = \frac{B_2 - c_2}{2} \quad \text{KAAVA 44}$$

Lisäksi määritellään y-suunnassa momenttia aiheuttavan lyhyemmän ulokkeen pituus, jota tarvitaan myöhemmin lävistysmitoituksessa (kaava 45) (kuva 20).

$$a_{12} = a_1 - 2e_y \quad \text{KAAVA 45}$$

e_y = kuormituksen epäkeskisyys y-suunnassa

Apusuureet

Seuraavaksi täytyy määritellä taivutusmitoituksessa tarvittavia apusuureita sekä vähimmäisraudoitusala.

Jännityssuorakaiteen tehollisen korkeuden kerroin määritetään kaavan 46 tai kaavan 47 mukaan betonin lujuusluokasta riippuen.

$$\lambda = 0,8 \quad \text{kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 46}$$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad \text{kun } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 47}$$

Betonin murtopuristuma määritetään kaavan 48 tai kaavan 49 mukaan betonin lujuusluokasta riippuen.

$$\varepsilon_{cu} = \frac{3,5}{1000} \quad \text{kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 48}$$

$$\varepsilon_{cu} = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4 \quad \text{kun } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 49}$$

f_{cm} = betonin lieriölujuuden keskiarvo

Jännityssuorakaiteen tehollisen korkeuden kerroin määritetään kaavan 50 tai kaavan 51 mukaan betonin lujuusluokasta riippuen.

$$\eta = 1,0 \quad \text{kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 50}$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \quad \text{kun } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad \text{KAAVA 51}$$

Raudoituksen myötövenymä määritetään kaavalla 52.

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad \text{KAAVA 51}$$

Raudoituksen myötöä vastaava puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus määritetään kaavalla 52.

$$\beta_{bd} = \lambda \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad \text{KAAVA 52}$$

Vähimmäisraudoitusala lasketaan laatoille sovelletulla kaavalla 53.

$$A_{s,\min} = \max \left(0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} d, 0,0013d \right) \quad \text{KAAVA 53}$$

Laattakentän raudoitus

Seuraavaksi mitoitetaan anturan laattakentän raudoitus molemmissa suunnissa. Mitoitus tapahtuu molemmissa suunnissa samalla tavalla, joten tässä käydään läpi ainoastaan toisen suunnan raudoituksen mitoittaminen.

Suhteellinen momentti lasketaan kaavalla 54.

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{\eta \cdot B_2 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad \text{KAAVA 54}$$

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus lasketaan kaavalla 55.

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad \text{KAAVA 54}$$

Testataan saadaanko raudoitus myötämään (kuva 22).

$$\text{myötääkö}_{\text{raudoitus}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \beta \leq \beta_{bd} \\ \text{"VIRHE, RAUDOITUS EI MYÖDÄ"} & \text{if } \beta > \beta_{bd} \end{cases}$$

myötääkö_{raudoitus} = "OK"

KUVA 22. Raudoituksen myötämisen testaus

Lasketaan vaadittu raudoitusala kaavalla 55.

$$A_{sy.vaadittu} = B_2 \cdot \omega \cdot d \cdot \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad \text{KAAVA 55}$$

ω = mekaaninen raudoitussuhde

Vähimmäisraudoitusala määritetään kaavalla 56.

$$A_{sy} = \max(A_{sy.vaadittu}, A_{s.min} \cdot B_2) \quad \text{KAAVA 56}$$

Tässä kohtaa valitaan tankopaksuus vetovalikosta (kuva 23). Tankopaksuutta voidaan muuttaa myöhemmin samasta vetolaatikosta, mikäli jokin tuleva ehto ei toteudu.

-Valitaan tankopaksuus:



KUVA 23. Tankopaksuuden valintalaatikko

Vähimmäistankomäärä lasketaan kaavalla 57.

$$n_{sy} = \frac{A_{sy}}{A_{s1}}$$

KAAVA 57

A_{s1} = yhden tangon pinta-ala

Vähimmäistankomäärällä toteutuva raudoitusmäärä lasketaan kaavalla 58 ja tankoväli kaavalla 59.

$$A_{sy.tot} = n_{sy} \cdot A_{s1}$$

KAAVA 58

$$k_y = \frac{B_2}{n_{sy}}$$

KAAVA 59

Maksimi tankoväli määritetään kaavalla 60.

$$S_{maks.slabb} = \min(2h, 250mm)$$

KAAVA 60

Tässä kohtaa tarkistetaan, toteutuuko maksimi tankoväliehto vähimmäistankomäärällä (kuva 24).

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } k_y \leq S_{\text{max.slabb}} \\ \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"} & \text{if } k_y > S_{\text{max.slabb}} \end{cases}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} = \text{"OK"}$$

KUVA 24. Maksimi tankoväliehdon tarkistus

Raudoituksen valinta

Monesti vähimmäisraudoitus olisi taivutuksen kannalta riittävä, mutta ankkurointi ja lävistysraudoitus vaativat usein rautamäärän lisäämistä. Tankomäärä valitaan vetolaatikosta (kuva 25). Tankomäärää voidaan muuttaa myöhemmin samasta vetolaatikosta, mikäli jokin ehto ei toteudu.

-Tankomäärä



KUVA 25. Tankomäärän valintalaatikko

Valitulla tankomäärällä toteutuva raudoitusala lasketaan kaavalla 61.

$$A_{sy.tot} = n_{sy} \frac{\phi_y^2}{4} \pi$$

KAAVA 61

n_{sy} = tankomäärä

ϕ_y = tankopaksuus

Valitulla tankomäärällä toteutuva tankoväli lasketaan kaavalla 62.

$$k_y = \frac{B_2}{n_{sy}}$$

KAAVA 62

Taivutusmitoituksen lopussa tarkistetaan uudestaan, toteutuuko maksimi tankoväli ehto valitulla tankomäärällä. Tankoväliehto tarkistetaan kuten kuvassa 24.

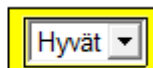
4.3.6 Ankkurointi

Ankkuroinnissa tarkistetaan, muodostuuko taivutusraudoituksille riittävä tartuntalujuus. Ankkurointi tapahtuu molemmissa suunnissa samalla tavalla, joten tässä käydään läpi ainoastaan toisen suunnan raudoituksen ankkurointi.

Ankkurointi taivutusleikkauksessa

Raudoituksen tartuntaolosuhteet valitaan vetovalikosta (kuva 26).

-Raudoituksen tartuntaolosuhteet:



KUVA 26. Tartuntaolosuhteiden valintalaatikko

Järeiden tankojen tartuntaa pienennetään kertoimella η_2 . Kerroin määritetään kaavan 63 tai kaavan 64 mukaan tankopaksuudesta riippuen.

$$\eta_{2,y} = 1.0$$

$$\text{kun } \phi_y \leq 32\text{mm}$$

KAAVA 63

$$\eta_{2,y} = \frac{(132\text{mm} - \phi_y)}{100\text{mm}}$$

$$\text{kun } \phi_y > 32\text{mm}$$

KAAVA 64

Raudoitustankojen tartuntalujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 65.

$$f_{bd} = 2.25\eta_1\eta_{2,y}f_{ctd}$$

KAAVA 65

Tangoissa vaikuttava normaalijännitys lasketaan kaavalla 66.

$$\sigma_{sd,y} = \min \left(f_{yd} \frac{A_{sy,vaad}}{A_{sy,tot}}, f_{yd} \right)$$

KAAVA 66

Ankkurointi pituuden perusarvo lasketaan kaavalla 67. Ankkurointipituuden mitoitusarvona käytetään perusarvoa, kun pienennyskertoimia $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ ei käytetä.

$$L_{bd,rqd,y} = L_{bd,y} = \frac{\phi_y \sigma_{sd,y}}{4 f_{bd}}$$

KAAVA 67

Toteutuva ankkurointipituus lasketaan kaavalla 68.

$$L_{by} = a_1 - c_{nom}$$

KAAVA 68

Ankkuroinnin tartuntapituuden riittävyys tarkistetaan (kuva 27).

$$Onko_{tartunta.pituus.rittava} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } L_{bd,y} \leq L_{b,y} \\ \text{"PITUUS EI RIITÄ"} & \text{if } L_{bd,y} > L_{b,y} \end{cases}$$

$$Onko_{tartunta.pituus.rittava} = \text{"OK"}$$

(Mikäli tartuntapituus ei riitä, täytyy määrittää pienennyskertoimet $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ja α_5 , tai parantaa ankkurointia muulla tavalla.)

KUVA 27. Ankkuroinnin tartuntapituuden tarkistus

Ankkurointi vinossa leikkauksessa

Vaadittu ankkuroitava vetovoima lasketaan kaavalla 69.

$$F_{sy,vaad} = \sigma_{gd} B_{2T} \frac{h_f}{1.8d} \left(a_1 - \frac{h_f}{4} + 0.15c_1 \right)$$

KAAVA 69

h_f = anturan korkeus

Toteutuva ankkuroitava vetovoima lasketaan kaavalla 70.

$$F_{bd,y} = \left(\frac{h_f}{2} - c_{nom}\right) f_{bd} (n_{sy} \pi \phi_y) \quad \text{KAAVA 70}$$

Ankkuroitavan vetovoima toteutuvuus tarkistetaan (kuva 28).

$$\text{Toteutuuko}_{\text{ankkuroitava.vetovoima}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{bd,y} \geq F_{sy.vaad} \\ \text{"VIRHE, VOIMA EI RIITÄ"} & \text{if } F_{bd,y} < F_{sy.vaad} \end{cases}$$

$$\text{Toteutuuko}_{\text{ankkuroitava.vetovoima}} = \text{"OK"}$$

(Mikäli voima ei riitä, täytyy lisätä tankomäärää.)

KUVA 28. Ankkuroinnin vetovoiman tarkistus

4.3.7 Lävistysmitoitus

Lävistysmitoituksen alussa määritetään kriittisen lävistyskartion mitta Eurokoodin tausta-aineistossa esitetyn käyrästön avulla (kuva 10). Käyrästä on tarkoitettu keskeisesti kuormitetulle neliöanturalle, mutta tässä mitoituspohjassa sovelletaan sitä myös epäkeskeisesti kuormitetulle suorakulmio anturalle. Määrittäväksi suunnaksi tulee anturan pidemmän sivun suunta. Kriittisen lävistyskartion mitan määrittämiseksi tehdään seuraavat toimenpiteet:

Käyrästön vaaka-akselilla on pilarin sivun mitan suhde anturan paksuuteen (kaava 71).

$$x_1 = \frac{c_1}{d} \quad \text{KAAVA 71}$$

Käyrästön suorat kuvaavat anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhdetta (kaava 72).

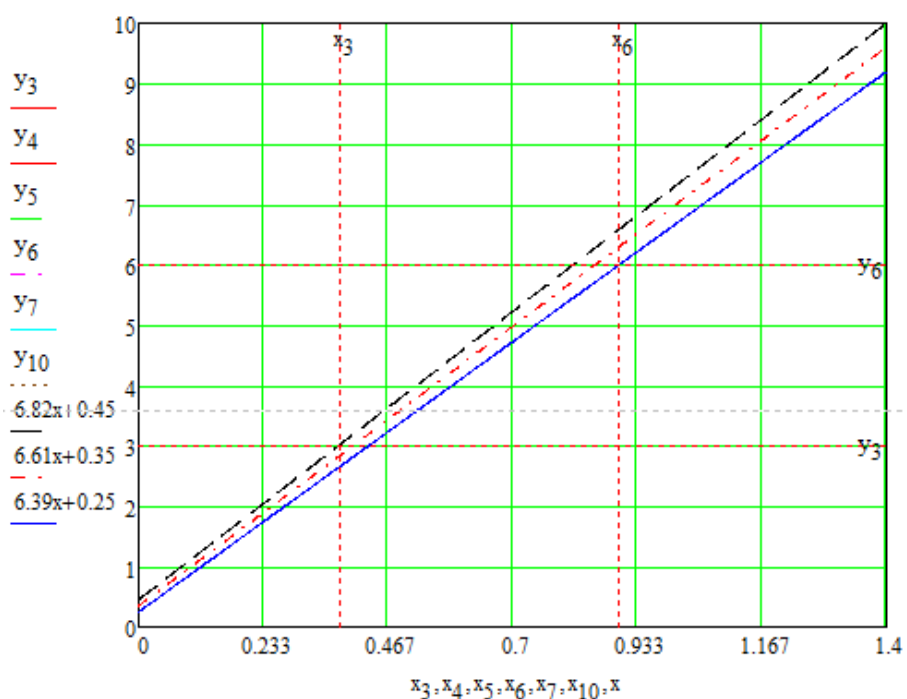
$$y_1 = \frac{B_1}{c_1} \quad \text{KAAVA 72}$$

Käyrästön pystyakselilla on kriittisen murtokartion mitan suhde anturan paksuuteen. Tämän suhteen määrittämiseksi täytyi ensiksi selvittää käyrästön suorien yhtälöiden vastaavuudet suorille annettuihin arvoihin (kuva 29).

$x_3 := 0.38$	$y_3 := 3$
$x_4 := 0.6$	$y_4 := 4$
$x_5 := 0.74$	$y_5 := 5$
$x_6 := 0.9$	$y_6 := 6$
$x_7 := 1.06$	$y_7 := 7$
$x_{10} := 1.4$	$y_{10} := 10$

KUVA 29. Käyrästön suorien yhtälöiden ja suorien arvojen vastaavuudet

Kuvan 29 mukaiset arvot sijoitetaan kuvaajaan x- ja y-akseleille. Arvojen leikkauspisteiden perusteella määritetään kuvan 30 mukaiset suorat. Yhden suoran sijasta määritettiin kolme suoraa, koska kaikki pisteet eivät osuneet samalle linjalle ja kriittisen lävistysmitan määrittämisessä olisi tullut liian isoja heittoja.



KUVA 30. Leikkauspisteiden perusteella määritetyt suorat

Kuvan 30 mukaisesta käyrästöstä saatujen suorien yhtälöiden ($y=kx+b$) avulla saadaan määritettyä suorien kulmakertoimet vastaamaan anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhdetta. Kulmakertoimen lasketaan kaavan 73, 74 tai 75 mukaan, riippuen anturan sivun mitan ja pilarin sivun mitan suhteesta.

$$x_{20} = \frac{y_1 - 0.45}{6.82} \quad \text{kun } y_1 = 3 - 3,3 \text{ tai } y_1 = 9 - 10 \quad \text{KAAVA 73}$$

$$x_{20} = \frac{y_1 - 0.35}{6.61} \quad \text{kun } y_1 = 3.3 - 3,7 \text{ tai } y_1 = 8 - 9 \quad \text{KAAVA 74}$$

$$x_{20} = \frac{y_1 - 0.25}{6.39} \quad \text{kun } y_1 = 3.7 - 8 \quad \text{KAAVA 75}$$

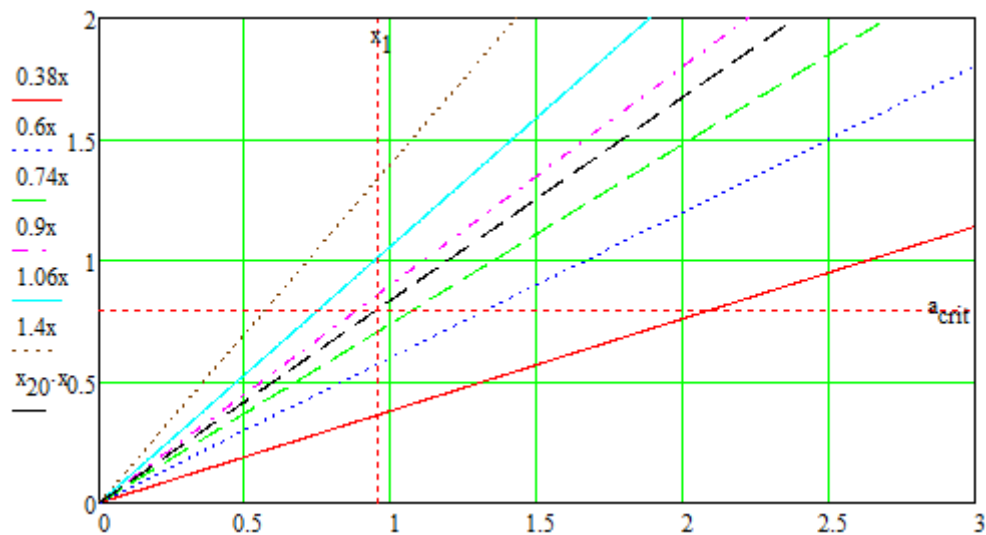
Kriittisen murtokartion suhde luku lasketaan kaavalla 76.

$$a_{crit}/d = x_{20}x_1 \quad \text{KAAVA 76}$$

Kriittisen murtokartion mitta lasketaan kaavan 77 mukaan.

$$a = a_{crit}d \quad \text{KAAVA 77}$$

Kuvassa 31 on esitetty kriittisen murtokartion mitan määrittämisessä käytetty kuvaaja.



KUVA 31. Kriittisen murtokartion määrittämisen kuvaaja

Tässä kohtaa tarkistetaan pysyykö murtokartio anturan alapinnassa kuormitetulla alueella (kuva 32).

$$\text{Pysyykö}_{\text{murtokartio.kuormitetulla.alueella}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } a \leq a_1 \\ \text{"OK"} & \text{if } a \leq a_2 \\ \text{"OK"} & \text{if } a \leq a_{12} \\ \text{"EI PYSY"} & \text{if } a > a_1 \\ \text{"EI PYSY"} & \text{if } a > a_2 \\ \text{"EI PYSY"} & \text{if } a > a_{12} \end{cases}$$

$$\text{Pysyykö}_{\text{murtokartio.kuormitetulla.alueella}} = \text{"OK"}$$

KUVA 32. Murtokartion pysyminen kuormitetulla alueella

Lävistysmitoituksessa tarkistetaan, onko anturan lävistyskestävyys $v_{Rd,c}$ suurempi tai yhtä suuri kuin piirille laskettu leikkausjännitys v_{Ed} . Leikkausjännitys lasketaan teoriaosuuden kaavan 29 mukaan. Leikkausjännityksen laskemisessa tarvittavat kaavat 20–30 on kaikki esitetty teoriaosuudessa, joten niitä ei tässä käydä uudelleen läpi. Myös lävistyskestävyyden laskentakaava 31 ja sen laskemisessa tarvittavat kaavat 8-13 on käsitelty valmiiksi teoriaosuudessa.

Kun lävistyskestävyys ja leikkausjännitys on laskettu, tarkistetaan, kestääkö antura lävistysrasituksen (kuva 33).

$$\text{Kestääkö}_{\text{antura.lävistyksen}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } v_{Rd,c} \geq v_{Ed} \\ \text{"EI KESTÄ"} & \text{if } v_{Rd,c} < v_{Ed} \end{cases}$$

$$\text{Kestääkö}_{\text{antura.lävistyksen}} = \text{"EI KESTÄ"}$$

KUVA 33. Lävistyskestävyyden tarkistus

Lopuksi mitoituspohja ilmoittaa käyttöasteen lävistyskestävyydelle (kuva 34).

$$\text{KÄYTTÖASTE} := \frac{v_{Ed}}{v_{Rd,c}} = 1.16$$

KUVA 34. Lävistyskestävyyden käyttöaste

Mikäli antura ei kestä lävistystä ja käyttöaste on siis yli yksi, täytyy kasvattaa anturan paksuutta tai lisätä taivutusraudoitusmäärää. Muutokset tehdään laskentapohjan valintalaatikoiden avulla, eli pohja täytyy käydä uudestaan läpi kriittisimpien kohtien osalta.

5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Mathcad-laskentapohja, joka laskee suorakulmaisen pilarianturan lävistyskestävyyden Eurokoodien mukaan. Rasi-
tusta vertaamalla kestävyys saadaan käyttöaste, josta tiedetään, riittääkö kestävyys vai ei. Opinnäytetyössä pyrittiin tekemään laskentapohja, jonka laskentaa voitaisiin seurata mahdollisimman hyvin. Tämän takia mitään laskelmia ei haluttu piilottaa, vaikka se olisi ollut mahdollista. Eurokoodien ohjeet ovat yllättävän monimutkaisia ja niitä tulkittaessa täytyi olla täsmällinen.

Lävistysmitoitus Eurokoodin mukaan on haasteellista, koska virallisesti voimassa olevan standardin SFS-EN 1992-1-1 kansallisen liitteen mukaan lävistysmitoitusta ei tehdä Suomessa toistaiseksi kyseisen standardin mukaan. Standardin lävistysmitoituksessa on huomattu ristiriitaisuuksia koetuloksiin nähden siten, että saatavat kapasiteetit ovat tietyissä tapauksissa epävarmalla puolella. Tässä työssä lävistysmitoitusta käsiteltiin kansallisen liitteen luonnoksen 2014 mukaan. Siinä voimassa olevan standardin puutteita on pyritty korjaamaan. Tätä laskentapohjaa ei siis virallisesti saa käyttää mitoittamiseen, mutta mikäli kansalliseen liitteeseen tehdään korjaussivu, voidaan kyseistä pohjaa hyödyntää hyvin pienillä muutoksilla.

Myös laskentapohjan tekemisessä oli haasteita. Etenkin kriittisen lävistyskartion määrittäminen oli hankalaa, koska lähteissä oli saatavilla tietoa ainoastaan neliöanturan lävistyskartion määrittämiseen. Lävistyskartion kaltevuus määritetään apukäyrästä avulla ja käyrästä on tarkoitettu ainoastaan neliöanturalle. Kyseistä kartiota jouduttiin soveltamaan tässä työssä myös suorakaiteen muotoiselle anturalle.

Laskentapohjaa voitaisiin kehittää tulevaisuudessa monimuotoisemmaksi liisäämällä geotekninen mitoitus osaksi pohjaa. Laskentapohjaa voisi tiivistää sijoittamalla useita kaavoja samaan yhtälöön. Tällä saataisiin pohjasta nopeampi ja tiiviimpi, mutta laskennan seuranta hankaloituisi.

LÄHTEET

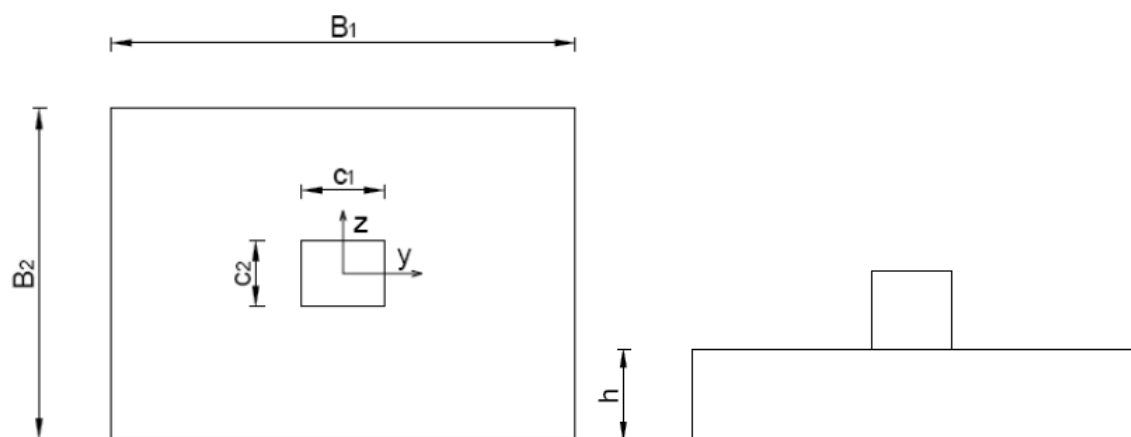
1. Leskelä, Matti V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus: by 210. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
2. Nykyri, Pekka 2015. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2: by 211. Helsinki: BY -koulutus Oy.
3. SFS-EN 1992-1-1. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
4. SFS-EN 1992-1-1. 2007. Kansallinen liite 7: Betonirakenteiden suunnittelu. Helsinki: Ympäristöministeriön asetus.
5. SFS-EN 1992-1-1. 2014. NA-FI. Kansallinen liite, Luonnos.
6. Commentary Eurocode 2. 2008. European Concrete Platform ASBL.

Pilarianturan rakennetekninen mitoitus

versio 1.0

-Lähtöarvot

-Anturan leveys (suunta y) [mm]:	<input type="text" value="2800"/>
-Anturan leveys (suunta z) [mm]:	<input type="text" value="2000"/>
-Anturan paksuus [mm]:	<input type="text" value="600"/>
-Pilarin sivun mitta (y-suunta) [mm]:	<input type="text" value="500"/>
-Pilarin sivun mitta (z-suunta) [mm]:	<input type="text" value="400"/>
-Rasitusluokka:	<input type="text" value="XC2"/>
-Toleranssiluokka:	<input type="text" value="1"/>
-Rakenteen käyttöikä:	<input type="text" value="50 vuotta"/>
-Betonin lujuusluokka:	<input type="text" value="C30/37"/>
-Raudoitus:	<input type="text" value="B500B"/>
-Mitoituskuorma, pysty [kN]:	<input type="text" value="1800"/>
-Mitoituskuorma, momentti [kNm]:	<input type="text" value="500"/>



$$B_1 := B_{1y} \cdot \text{mm} = 2800 \cdot \text{mm}$$

$$B_2 := B_{2z} \cdot \text{mm} = 2000 \cdot \text{mm}$$

$$h := h_a \cdot \text{mm} = 600 \cdot \text{mm}$$

$$c_1 := c_{1y} \cdot \text{mm} = 500 \cdot \text{mm}$$

$$c_2 := c_{2z} \cdot \text{mm} = 400 \cdot \text{mm}$$

$$N_{Ed} := N_{Ed,p} \cdot \text{kN} = 1800 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Ed} := M_{Ed,m} \cdot \text{kN} \cdot \text{m} = 500 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

-Betonin osavarmuusluku:

$$\gamma_c := \begin{cases} 1.35 & \text{if Toleranssiluokka} = 2 \\ 1.5 & \text{if Toleranssiluokka} = 1 \end{cases}$$

$$\gamma_c = 1.5$$

-Teräksen osavarmuusluku:

$$\gamma_s := \begin{cases} 1.10 & \text{if Toleranssiluokka} = 2 \\ 1.15 & \text{if Toleranssiluokka} = 1 \end{cases}$$

$$\gamma_s = 1.15$$

-Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät: (EC2 NA-FI s.4)

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

-Betoniteräksen kimmokertoimen mitoitusarvo:

$$E_s := 200000 \text{ MPa}$$

-Lujuudet:

-Betoniteräksen ominaisvetolujuus:

$$f_{yk} := \begin{cases} 500 \text{ MPa} & \text{if Raudoitus} = 1 \\ 700 \text{ MPa} & \text{if Raudoitus} = 2 \end{cases}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

-Betonin lieriölujuuden ominaisarvo (28 vrk.):

$$f_{ck} := \begin{cases} 25\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 1 \\ 30\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 2 \\ 35\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 3 \\ 40\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 4 \\ 45\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 5 \\ 50\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 6 \\ 55\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 7 \\ 60\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 8 \\ 70\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 9 \\ 80\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 10 \\ 90\text{MPa} & \text{if Lujuusluokka} = 11 \\ 0\text{MPa} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \boxed{f_{ck} = 30\text{MPa}}$$

-Betonin laskentapuristuslujuus:

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \boxed{f_{cd} = 17\text{MPa}}$$

-Betonin lieriölujuuden keskiarvo

$$f_{cm} := f_{ck} + 8\text{MPa} \quad \boxed{f_{cm} = 38\text{MPa}}$$

-Betonin keskimääräinen vetolujuus:

$$f_{ctm} := \begin{cases} \left[0.30\text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] & \text{if } f_{ck} \leq 50\text{MPa} \\ \left[2.12\text{MPa} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10\text{MPa}} \right) \right] \right] & \text{if } 50\text{MPa} < f_{ck} \leq 90\text{MPa} \end{cases} \quad \boxed{f_{ctm} = 2.896\text{MPa}}$$

-Betonin laskentavetolujuus:

$$f_{ctd} := 0.7 \cdot \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} \quad \boxed{f_{ctd} = 1.352\text{MPa}}$$

-Betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo:

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \boxed{f_{yd} = 434.783\text{MPa}}$$

-Betonipeite:

-Tartuntavaatimuksesta johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo: (EC2 taulukko 4.3N (FI))

$$c_{\min, \text{durXC1}} := \begin{cases} 10\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 30\text{MPa} \\ 5\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \geq 30\text{MPa} \\ 5\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 30\text{MPa} \wedge \text{Toleranssiluokka} = 2 \\ 0\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \geq 30\text{MPa} \wedge \text{Toleranssiluokka} = 2 \end{cases}$$

$$c_{\min, \text{durXC2}} := \begin{cases} 20\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 35\text{MPa} \\ 25\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 35\text{MPa} \wedge \text{Käyttöikä} = 2 \\ 20\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \geq 35\text{MPa} \wedge \text{Käyttöikä} = 2 \\ 15\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \geq 35\text{MPa} \wedge \text{Käyttöikä} = 2 \wedge \text{Toleranssiluokka} = 2 \\ 15\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \geq 35\text{MPa} \\ 10\text{mm} & \text{if } f_{\text{ck}} \geq 35\text{MPa} \wedge \text{Toleranssiluokka} = 2 \end{cases}$$

$$c_{\min, \text{dur}} := \begin{cases} c_{\min, \text{durXC1}} & \text{if Rasitusluokka} = 1 \\ c_{\min, \text{durXC2}} & \text{if Rasitusluokka} = 2 \end{cases}$$

$$c_{\min, \text{dur}} = 20\text{mm}$$

-Oletetaan raudoituksen halkaisija [mm]:

$$\phi := \begin{cases} 0\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 1 \\ 6\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 2 \\ 8\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 3 \\ 10\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 4 \\ 12\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 5 \\ 16\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 6 \\ 20\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 7 \\ 25\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 8 \\ 32\text{mm} & \text{if Halkaisija} = 9 \end{cases}$$

$$\phi = 20\text{mm}$$

-Tartuntavaatimuksesta johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo (yksittäiset tangot): (EC2 s.50.)

$$c_{\min, b} := \phi$$

$$c_{\min, b} = 20\text{mm}$$

-Betonipeitteen vähimmäisarvo

$$c_{\min} := \max(c_{\min, \text{dur}}, c_{\min, \text{b}}, 10\text{mm})$$

$$c_{\min} = 20\text{mm}$$

-Suunnittelussa huomioon otettava mitta poikkeama [mm]:
(EC2 1992-1-1 kansallinen liite kohta 4.4.1.3.)

$$40$$

$$\Delta c_{\text{dev}} := \text{Mittapoikkeama-mm}$$

$$\Delta c_{\text{dev}} = 40\text{mm}$$

-Betonipeitteen nimellisarvo:

$$c_{\text{nom}} := c_{\min} + \Delta c_{\text{dev}}$$

$$c_{\text{nom}} = 60\text{mm}$$

-Tehollinen korkeus:

-Määritetään alustava tehollinen korkeus oletetun raudituksen halkaisijan perusteella:

$$d := h - \frac{1.1\phi}{2} - c_{\text{nom}}$$

$$d = 529\text{mm}$$

Tämä d-mitta rasiutumassa suunnassa \Leftrightarrow rauditus alempaan kerrokseen.

-Valitaan tehollinen korkeus (valitaan pienempi mitta, kuin yläpuolella oleva d-mitta):

$$520$$

$$d := d_{\text{alustava}} \cdot \text{mm}$$

$$d = 520\text{mm}$$

-Kuomitus

-Kuorman epäkeskisyyys:

$$e_y := \frac{M_{\text{Ed}}}{N_{\text{Ed}}}$$

$$e_y = 277.778\text{mm}$$

$$e_z := 0$$

$$e_z = 0\text{mm}$$

-Anturan kuormitettu pinta-ala:

$$B_{1T} := B_1 - 2 \cdot e_y$$

$$B_{1T} = 2.244\text{m}$$

$$B_{2T} := B_2 - 2 \cdot e_z$$

$$B_{2T} = 2\text{m}$$

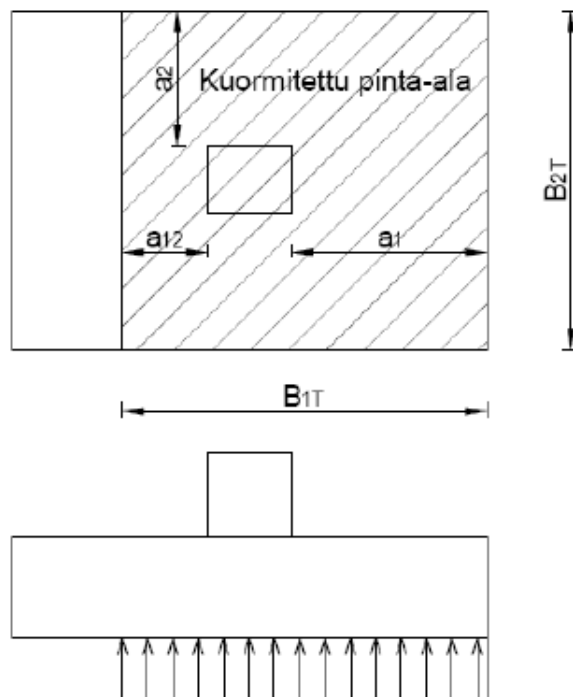
$$A_T := B_{1T} \cdot B_{2T}$$

$$A_T = 4.489\text{m}^2$$

-Pohjapaine:

$$\sigma_{gd} := \frac{N_{Ed}}{A_T}$$

$$\sigma_{gd} = 400.99 \cdot \text{kPa}$$



-Taivutusmitoitus

-Momentit:

-Taivutusmitoitus pilarin sivun linjassa:

-Ulokkeen pituus pitemmässä suunnassa, merkitään suunta y:

$$a_1 := \frac{B_1 - c_1}{2}$$

$$a_1 = 1150 \cdot \text{mm}$$

-pienemmänkuorman puolella (tarvitaan lävistysmitoituksessa):

$$a_{12} := a_1 - 2 \cdot e_y$$

$$a_{12} = 594.444 \cdot \text{mm}$$

-Momentti suunnassa y:

$$M_{Ed,y} := \sigma_{gd} \cdot \frac{a_1^2}{2} \cdot B_{2T}$$

$$M_{Ed,y} = 530.309 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

-Ulokkeen pituus lyhyemmässä suunnassa, merkitään suunta z:

$$a_2 := \frac{B_2 - c_2}{2} = 0.8 \text{ m} \quad \boxed{a_2 = 800 \cdot \text{mm}}$$

-Momentti suunnassa z:

$$M_{\text{Ed},z} := \sigma_{\text{gd}} \cdot \frac{a_2^2}{2} \cdot B_{1T} \quad \boxed{M_{\text{Ed},z} = 288 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}}$$

-Mitoitus:

-Jännityssuorakaiteen tehollisen korkeuden määrittävä kerroin: (EC2 s.36)

$$\lambda := \begin{cases} 0.8 & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa} \\ \left[0.8 - \frac{(f_{\text{ck}} - 50 \text{ MPa})}{400} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} \right] & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{\text{ck}} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad \boxed{\lambda = 0.8}$$

-Betonin murtopuristuma: (EC2 s.30 taulukko 3.1)

$$\epsilon_{\text{cu}} := \begin{cases} \frac{3.5}{1000} & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa} \\ \frac{2.8 + 27 \cdot \left[\frac{(98 \text{ MPa} - f_{\text{cm}})}{100 \text{ MPa}} \right]^4}{1000} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{\text{ck}} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad \boxed{\epsilon_{\text{cu}} = 0.004}$$

-Jännityssuorakaiteen tehollisen korkeuden määrittävä kerroin: (EC2 s.37)

$$\eta := \begin{cases} 1.0 & \text{if } f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa} \\ \left[1.0 - \frac{(f_{\text{ck}} - 50 \text{ MPa})}{200} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} \right] & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{\text{ck}} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad \boxed{\eta = 1}$$

-Raudituksen myötövenymä:

$$\epsilon_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_s} = 0.217\% \quad \boxed{\epsilon_{\text{yd}} = 0.002}$$

-Raudituksen myötöä vastaava puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus:

$$\beta_{\text{bd}} := \lambda \cdot \frac{\epsilon_{\text{cu}}}{\epsilon_{\text{cu}} + \epsilon_{\text{yd}}} \quad \boxed{\beta_{\text{bd}} = 0.493}$$

-Vähimmäisraudoitusala (laatoille sovelletulla kaavalla) (EC2 luku 9.2.1.1)

$$A_{s,min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, 0.0013 \cdot d\right)$$

$$A_{s,min} = 783.205 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

-Kenttä suunta y:

$$M_{Ed} := M_{Ed,y}$$

Suhteellinen momentti:

$$\mu := \frac{M_{Ed}}{\eta \cdot B_2 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.058$$

$$\mu = 0.058$$

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus:

$$\beta := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} = 0.059$$

$$\beta = 0.059$$

Testataan saadaanko raudoitus myötämään?

$$\text{myötääkö raudoitus} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \beta \leq \beta_{bd} \\ \text{"VIRHE, RAUDOITUS EI MYÖDÄ"} & \text{if } \beta > \beta_{bd} \end{cases}$$

$$\text{myötääkö raudoitus} = \text{"OK"}$$

-Mekaaninen raudoitussuhde:

$$\omega := \beta$$

-Vaadittu raudoitusala

$$A_{sy,vaadittu} := B_2 \cdot \omega \cdot d \cdot \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_{sy,vaadittu} = 2417.458 \cdot \text{mm}^2$$

$$(A_{s,min} \cdot B_2) = 1566.41 \cdot \text{mm}^2$$

-Vähimmäisraudoitusalaksi valikoituu:

$$A_{sy} := \max(A_{sy,vaadittu}, A_{s,min} \cdot B_2)$$

$$A_{sy} = 2417.458 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sy,vaad} := A_{sy}$$

-Valitaan tankopaksuus:

$$\phi_y := \begin{cases} 0\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 1 \\ 6\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 2 \\ 8\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 3 \\ 10\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 4 \\ 12\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 5 \\ 16\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 6 \\ 20\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 7 \\ 25\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 8 \\ 32\text{mm} & \text{if Halkaisija}_y = 9 \end{cases}$$

$$\phi_y = 20\text{mm}$$

-Yhden tangon pinta-ala:

$$A_{s1} := \frac{\phi_y^2}{4} \cdot \pi$$

$$A_{s1} = 314.159\text{mm}^2$$

-Vähimmäistankomäärä:

$$n_{sy} := \frac{A_{sy}}{A_{s1}}$$

$$n_{sy} = 7.695$$

-Vähimmäistankomäärällä toteutuva rauditusala:

$$A_{sy.tot} := n_{sy} \cdot A_{s1} = 2417.458\text{mm}^2$$

$$A_{sy.tot} = 2417.458\text{mm}^2$$

-Vähimmäistankomäärällä toteutuva tankoväli:

$$k_y := \frac{B_2}{n_{sy}} = 259.909\text{mm}$$

$$k_y = 259.909\text{mm}$$

-Maksimi tankoväli:

$$S_{\text{max.slab}} := \min(2 \cdot h, 250\text{mm})$$

$$S_{\text{max.slab}} = 250\text{mm}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } k_y \leq S_{\text{max.slab}} \\ \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"} & \text{if } k_y > S_{\text{max.slab}} \end{cases}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} = \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"}$$

-Valitaan rauditus y-suunnassa

-Tankopaksuus

$$\phi_y = 20 \cdot \text{mm}$$

-Tankomäärä

-Toteutuva rauditusala:

$$A_{\text{sy.tot}} := n_{\text{sy}} \frac{\phi_y^2}{4} \cdot \pi = 6283 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{\text{sy.tot}} = 6283.185 \cdot \text{mm}^2$$

-Vaadittu rauditusala:

$$A_{\text{sy.vaad}} = 2417.458 \cdot \text{mm}^2$$

-Toteutuva tankoväli:

$$k_y := \frac{B_2}{n_{\text{sy}}} = 100 \cdot \text{mm}$$

$$k_y = 100 \cdot \text{mm}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } k_y \leq S_{\text{max.slab}} \\ \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"} & \text{if } k_y > S_{\text{max.slab}} \end{cases}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} = \text{"OK"}$$

-Kenttä suunta z:

$$M_{\text{Ed}} := M_{\text{Ed.z}}$$

Suhteellinen momentti:

$$\mu := \frac{M_{\text{Ed}}}{\eta \cdot B_1 \cdot d^2 \cdot f_{\text{cd}}}$$

$$\mu = 0.022$$

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus:

$$\beta_1 = \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}$$

$$\beta = 0.059$$

Testataan saadaanko raudoitus myötämään?

$$\text{myötääkö raudoitus} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \beta \leq \beta_{bd} \\ \text{"VIRHE, RAUDOITUS EI MYÖDÄ"} & \text{if } \beta > \beta_{bd} \end{cases}$$

$$\text{myötääkö raudoitus} = \text{"OK"}$$

-Mekaaninen raudoitussuhde:

$$\omega := \beta$$

-Vaadittu raudoitusala

$$A_{sz,vaadittu} := B_1 \cdot \omega \cdot d \cdot \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = 3384.441 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sz,vaadittu} = 3384.441 \cdot \text{mm}^2$$

$$(A_{s,min} \cdot B_1) = 2192.974 \cdot \text{mm}^2$$

-Vähimmäis raudoitusalaksi valikoituu:

$$A_{sz} := \max(A_{sz,vaadittu}, A_{s,min} \cdot B_1)$$

$$A_{sz} = 3384.441 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sz,vaad} := A_{sz}$$

-Valitaan tankopaksuus:

$$20$$

$$\phi_z := \begin{cases} 0\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 1 \\ 6\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 2 \\ 8\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 3 \\ 10\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 4 \\ 12\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 5 \\ 16\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 6 \\ 20\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 7 \\ 25\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 8 \\ 32\text{mm} & \text{if Halkaisija}_z = 9 \end{cases}$$

$$\phi_z = 20 \cdot \text{mm}$$

Yhden tangon pinta-ala:

$$A_{s2} := \frac{\phi_z^2}{4} \cdot \pi$$

$$A_{s2} = 314.159 \cdot \text{mm}^2$$

-Vähimmäistankomäärä:

$$n_{sz} := \frac{A_{sz}}{A_{s2}}$$

$$n_{sz} = 10.773$$

-Vähimmäistankomäärällä toteutuva raudoitusala:

$$A_{sz.tot} := n_{sz} \cdot A_{s2}$$

$$A_{sz.tot} = 3384.441 \cdot \text{mm}^2$$

-Vähimmäistankomäärällä toteutuva tankoväli:

$$k_z := \frac{B_1}{n_{sz}}$$

$$k_z = 259.909 \cdot \text{mm}$$

-Maksimi tankoväli:

$$S_{\text{max.slub}} := \min(2 \cdot h, 250 \text{ mm})$$

$$S_{\text{max.slub}} = 250 \cdot \text{mm}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } k_z \leq S_{\text{max.slub}} \\ \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"} & \text{if } k_z > S_{\text{max.slub}} \end{cases}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} = \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"}$$

-Valitaan raudoitus z-suunnassa

-Tankopaksuus

$$\phi_z = 20 \cdot \text{mm}$$

-Tankomäärä

-Toteutuva raudoitusala:

$$A_{sz.tot} := n_{sz} \cdot \frac{\phi_z^2}{4} \cdot \pi = 4398 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sz.tot} = 4398.23 \cdot \text{mm}^2$$

-Vaadittu raudoitusala:

$$A_{sz.vaad} = 3384.441 \cdot \text{mm}^2$$

-Toteutuva tankoväli:

$$k_z := \frac{B_1}{n_{sz}} = 200 \cdot \text{mm}$$

$$k_z = 200 \cdot \text{mm}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } k_y \leq S_{\text{max.slab}} \\ \text{"TANKO MÄÄRÄÄ LISÄTTÄVÄ"} & \text{if } k_y > S_{\text{max.slab}} \end{cases}$$

$$\text{toteutuuko}_{\text{max.tankovälin.ehto}} = \text{"OK"}$$

-Tarkistetaan ankkurointi

-Taivutusleikkauksessa

-Raudoituksen tartuntaolosuhteet:

Hyvät

-Suunta-y:

-Järeiden tankojen tartuntaa pienennetään kertoimella η_2 :

$$\eta_{2,y} := \begin{cases} 1.0 & \text{if } \phi_y \leq 32 \text{mm} \\ \frac{(132 \text{mm} - \phi_y)}{100 \text{mm}} & \text{if } \phi_y > 32 \text{mm} \end{cases}$$

$$\eta_{2,y} = 1$$

-Raudoitustankojen tartuntalujuuden mitoitusarvo:

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_{2,y} \cdot f_{ctd}$$

$$f_{bd} = 3.041 \cdot \text{MPa}$$

-Tangoissa vaikuttava normaalijännitys:

$$\sigma_{sd,y} := \min \left(f_{yd} \cdot \frac{A_{sy,vaad}}{A_{sy,tot}}, f_{yd} \right)$$

$$\sigma_{sd,y} = 167.283 \cdot \text{MPa}$$

-Ankkurointi pituuden perusarvo:

$$L_{bd,rqd,y} := \frac{\phi_y}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd,y}}{f_{bd}}$$

$$L_{bd,rqd,y} = 275.019 \cdot \text{mm}$$

-Ankkurointipituuden mitoitusarvo:

$$L_{bd,y} := L_{bd,rqd,y}$$

-Toteutuva ankkurointi pituus:

$$L_{b,y} := a_1 - c_{nom} = 1090 \cdot \text{mm} \quad \boxed{L_{b,y} = 1090 \cdot \text{mm}}$$

$$\text{Onko}_{\text{tartunta.pituus.riittävä}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } L_{bd,y} \leq L_{b,y} \\ \text{"PITUUS EI RIITÄ"} & \text{if } L_{bd,y} > L_{b,y} \end{cases}$$

$$\text{Onko}_{\text{tartunta.pituus.riittävä}} = \text{"OK"}$$

(Mikäli tartuntapituus ei riitä, täytyy määrittää pienennyskertoimet $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ja α_5 , tai parantaa ankkurointia muulla tavalla.)

-Suunta-z:

Järeiden tankojen tartuntaa pienennetään kertoimella η_2 :

$$\eta_{2,z} := \begin{cases} 1.0 & \text{if } \phi_z \leq 32\text{mm} \\ \frac{(132\text{mm} - \phi_z)}{100\text{mm}} & \text{if } \phi_z > 32\text{mm} \end{cases} \quad \boxed{\eta_{2,z} = 1}$$

-Raudoitustankojen tartuntalujuuden mitoitusarvo:

$$f_{ad} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_{2,z} \cdot f_{ctd} \quad \boxed{f_{bd} = 3.041 \cdot \text{MPa}}$$

-Tangoissa vaikuttava normaalijännitys:

$$\sigma_{sd,z} := \min \left(f_{yd} \cdot \frac{A_{sz,vaad}}{A_{sz,tot}}, f_{yd} \right) \quad \boxed{\sigma_{sd,z} = 334.566 \cdot \text{MPa}}$$

-Ankkurointi pituuden perusarvo:

$$L_{bd,rqd,z} := \frac{\phi_z}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd,z}}{f_{bd}} \quad \boxed{L_{bd,rqd,z} = 550.039 \cdot \text{mm}}$$

-Ankkurointipituuden mitoitusarvo:

$$L_{bd,z} := L_{bd,rqd,z}$$

-Toteutuva ankkurointi pituus:

$$L_{b,z} := a_2 - c_{nom} \quad \boxed{L_{b,z} = 740 \cdot \text{mm}}$$

$$\text{Onko_tartunta.pituus.riittävä} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } L_{bd,z} \leq L_{b,z} \\ \text{"PITUUS EI RIITÄ"} & \text{if } L_{bd,z} > L_{b,z} \end{cases}$$

$$\text{Onko_tartunta.pituus.riittävä} = \text{"OK"}$$

(Mikäli tartuntapituus ei riitä, täytyy määrittää pienennyskertoimet $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ja α_5 , tai parantaa ankkurointia muulla tavalla.)

-Vinossa leikkauksessa

$$h_f := h = 600 \cdot \text{mm}$$

-Suunta y:

-Vaadittu ankkuroitava vetovoima:

$$F_{sy.vaad} := \sigma_{gd} \cdot B_{2T} \frac{h_f}{1.8 \cdot d} \cdot \left(a_1 - \frac{h_f}{4} + 0.15 \cdot c_1 \right) \quad \boxed{F_{sy.vaad} = 552.647 \cdot \text{kN}}$$

-Toteutuva ankkuroituva vetovoima:

$$F_{bd,y} := \left(\frac{h_f}{2} - c_{nom} \right) \cdot f_{bd} \cdot (n_{sy} \pi \cdot \phi_y) \quad \boxed{F_{bd,y} = 917.232 \cdot \text{kN}}$$

$$\text{Toteutuuko_ankkuroitava.vetovoima} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{bd,y} \geq F_{sy.vaad} \\ \text{"VIRHE, VOIMA EI RIITÄ"} & \text{if } F_{bd,y} < F_{sy.vaad} \end{cases}$$

$$\text{Toteutuuko_ankkuroitava.vetovoima} = \text{"OK"}$$

(Mikäli voima ei riitä, täytyy lisätä tankomäärää.)

-Suunta z:

-Vaadittu ankkuroitava vetovoima:

$$F_{sz.vaad} := \sigma_{gd} \cdot B_{1T} \frac{h_f}{1.8 \cdot d} \cdot \left(a_2 - \frac{h_f}{4} + 0.15 \cdot c_2 \right) \quad \boxed{F_{sz.vaad} = 409.615 \cdot \text{kN}}$$

-Toteutuva ankkuroituva vetovoima:

$$F_{bd,z} := \left(\frac{h_f}{2} - c_{nom} \right) \cdot f_{bd} \cdot (n_{sz} \pi \cdot \phi_z) \quad \boxed{F_{bd,z} = 642.062 \cdot \text{kN}}$$

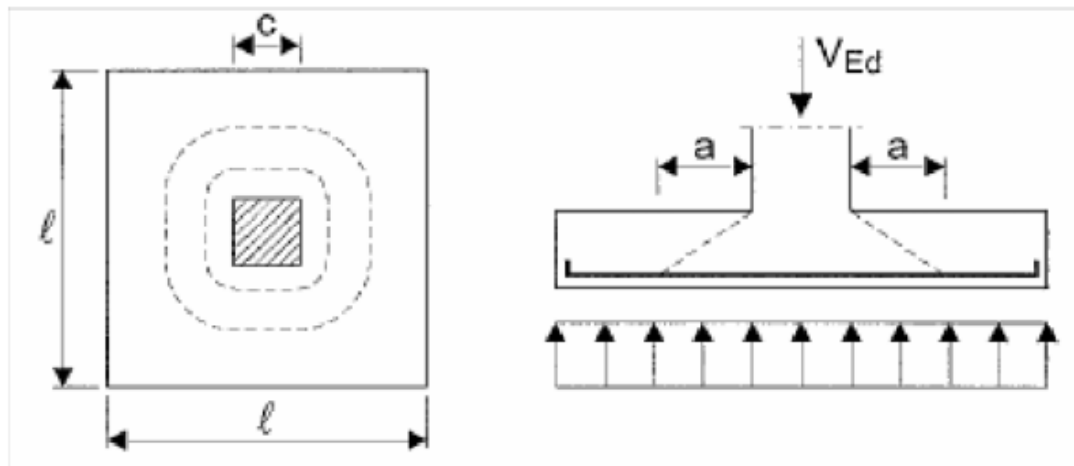
$$\text{Toteutuuko ankkuroitava vetovoima} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{bd,z} \geq F_{sz,vaad} \\ \text{"VIRHE, VOIMA EI RIITÄ"} & \text{if } F_{bd,z} < F_{sz,vaad} \end{cases}$$

$$\text{Toteutuuko ankkuroitava vetovoima} = \text{"OK"}$$

(Mikäli voima ei riitä, täytyy lisätä tankomäärää.)

LÄVISTYSMITOITUS EC2:N SUOSITUKSEN MUKAAN

Eurokoodin lävistysmitoitus anturoissa tehdään hieman eri tavalla kuin tavallisissa laatoissa. Anturoissa käytetään muuttujana murtokartion kaltevuutta (murtokartion vaakaprojektio a)



-Lopullinen tehollinen korkeus:

$$d_y := h - c_{nom} - \frac{1.1 \cdot \phi_y}{2}$$

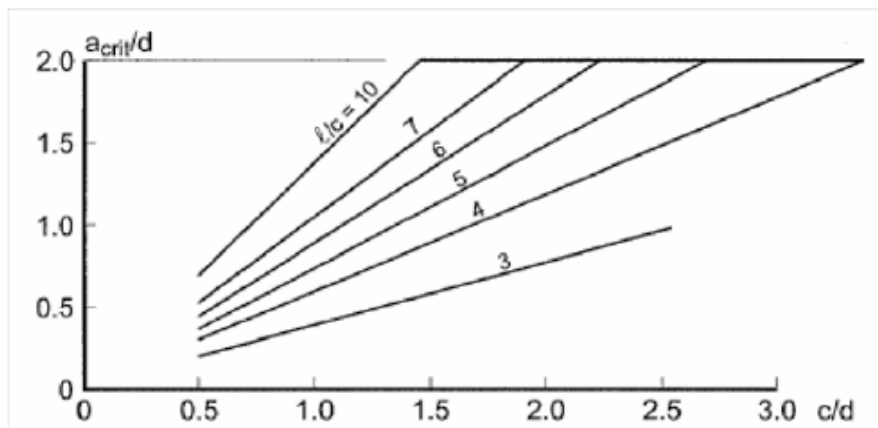
$$d_y = 529 \cdot \text{mm}$$

$$d_z := d_y - \frac{1.1 \cdot \phi_y}{2} - \frac{1.1 \cdot \phi_z}{2} = 507 \cdot \text{mm}$$

$$d_z = 507 \cdot \text{mm}$$

$$d := \frac{d_y + d_z}{2}$$

$$d = 518 \cdot \text{mm}$$

-Kriittinen murtokartio

-Käyrästä on tarkoitettu keskeisesti kuormitetulle neliöanturalle, mutta sovelletaan sitä myös epäkeskeisesti kuormitetulle suorakulmioanturalle. Määrääväksi suunnaksi tulee suunta-y.

-Vaaka akselilla on pilarin sivun mitan suhde anturan paksuuteen:

-y-suunnassa:

$$x_1 := \frac{c_1}{d} = 0.965$$

$$x_1 = 0.965$$

-Käyrästä suorat kuvaavat anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhdetta:

-y-suunnassa:

$$y_1 := \frac{B_1}{c_1} = 5.6$$

$$y_1 = 5.6$$

-Pystyakselilla on kriittisen murtokartion mitan suhde anturan paksuuteen, jonka määrittämiseen tarvitaan seuraavat toimenpiteet:

-Määritetään suorien yhtälöiden vastaavuus l/c suhteeseen:

$$x_3 := 0.38 \quad y_3 := 3$$

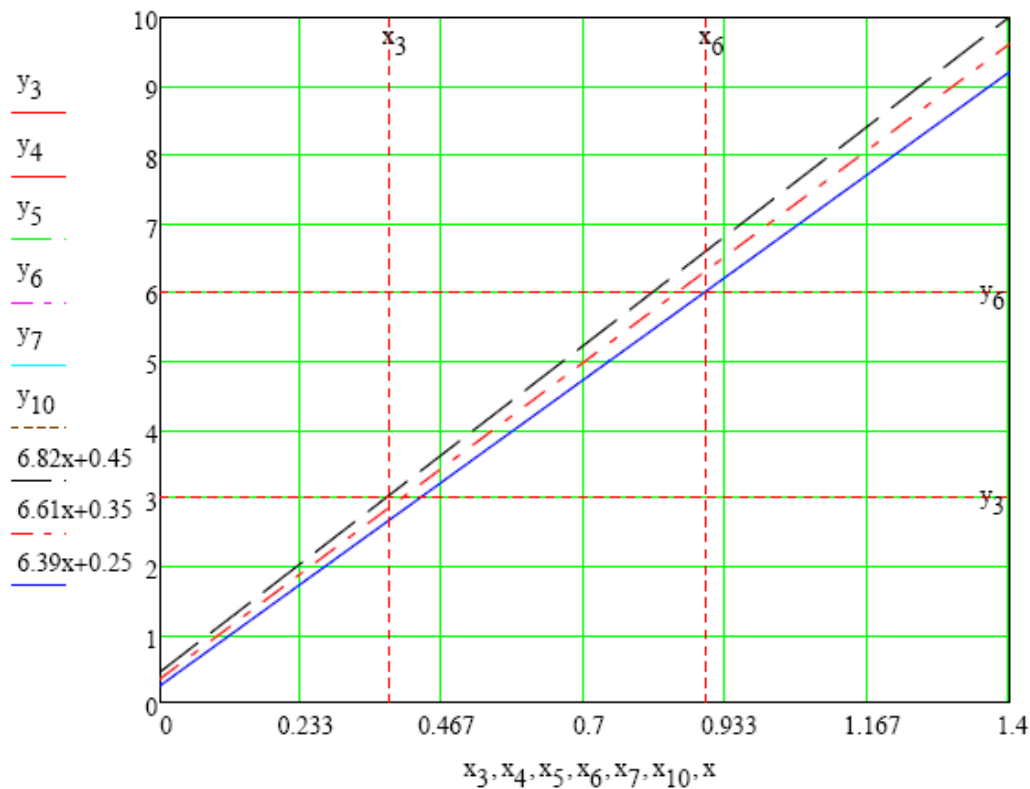
$$x_4 := 0.6 \quad y_4 := 4$$

$$x_5 := 0.74 \quad y_5 := 5$$

$$x_6 := 0.9 \quad y_6 := 6$$

$$x_7 := 1.06 \quad y_7 := 7$$

$$x_{10} := 1.4 \quad y_{10} := 10$$



-Määritetään kolme suoraa yhteneväisyyksien leikkauspisteiden perusteella, koska kaikki pisteet eivät osuneet samalle suoralle ja kriittisen lävistysmitan määrittämisessä olisi tullut liian isoja heittoja.

-Käyrästä saatuja yhtälöiden ($y=kx+b$) avulla saadaan määritettyä suorien kulmakertoimet vastaamaan tehtävän anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhdetta:

-Anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhteen ollessa välillä $y_1=3-3,3$ tai $y_1=9-10$ kulmakertoimeksi tulee:

$$x_{10} := \frac{y_1 - 0.45}{6.82} \quad \boxed{x_{10} = 0.755}$$

-Anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhteen ollessa välillä $y_1=3.3-3,7$ tai $y_1=8-9$ kulmakertoimeksi tulee:

$$x_{11} := \frac{y_1 - 0.35}{6.61} \quad \boxed{x_{11} = 0.794}$$

-Anturan sivun mitan ja pilarin sivun suhteen ollessa välillä $y_1=3.7-8$ kulmakertoimeksi tulee:

$$x_{12} := \frac{y_1 - 0.25}{6.39} \quad \boxed{x_{12} = 0.837}$$

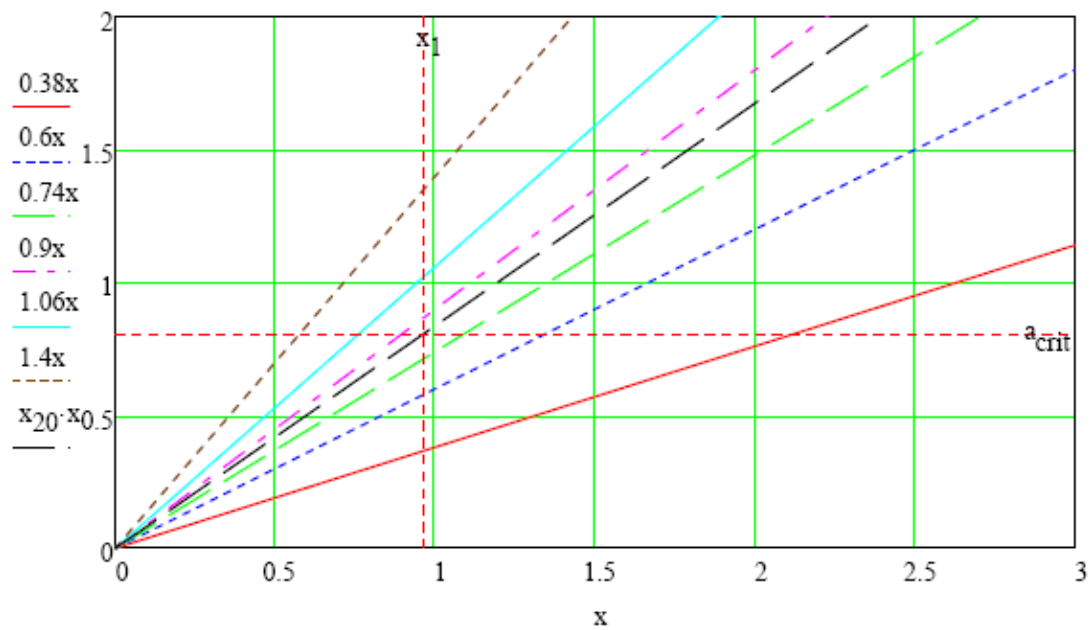
-Kulmakerroin:

$$x_{20} := \begin{cases} x_{10} & \text{if } y_1 \leq 3.3 \\ x_{11} & \text{if } 3.3 < y_1 \leq 3.7 \\ x_{12} & \text{if } 3.7 < y_1 \leq 8 \\ x_{11} & \text{if } 8 < y_1 \leq 9 \\ x_{10} & \text{if } y_1 > 9 \end{cases} \quad \boxed{x_{20} = 0.837}$$

-Kriittisen murtokartion suhde luku:

$$a_{\text{crit}} := x_{20} \cdot x_1 \quad \boxed{a_{\text{crit}} = 0.8082}$$

-Kriittisen murtokartion määrittämisen kuvaaja:



Kriittisen murtokartion mitaksi tulee:

$$a_1 = 1.15 \text{ m}$$

$$a := a_{\text{crit}} \cdot d \quad \boxed{a = 418.623 \cdot \text{mm}}$$

$$a_{12} = 0.594 \text{ m}$$

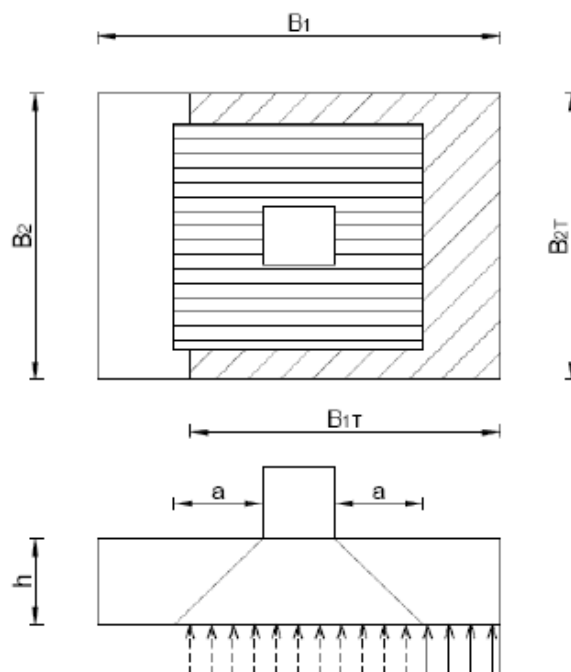
$$a_2 = 0.8 \text{ m}$$

-Lävityskuorma

-Tarkistettava pysykö murtokartio anturan alapinnassa kuormitetulla alueella:

$$\text{Pysykö}_{\text{murtokartio.kuormitetulla.alueella}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } a \leq a_1 \\ \text{"OK"} & \text{if } a \leq a_2 \\ \text{"OK"} & \text{if } a \leq a_{12} \\ \text{"EI PYSY"} & \text{if } a > a_1 \\ \text{"EI PYSY"} & \text{if } a > a_2 \\ \text{"EI PYSY"} & \text{if } a > a_{12} \end{cases}$$

$$\text{Pysykö}_{\text{murtokartio.kuormitetulla.alueella}} = \text{"OK"}$$



-Lävistyskartion ulkopuolelle jäävä anturan pinta-ala:

$$A_{\text{eff}} := B_{1T} \cdot B_{2T} - \left[2 \cdot a \cdot (c_1 + c_2) + \pi \cdot a^2 \right] \quad A_{\text{eff}} = 3.185 \text{ m}^2$$

-Lävistyskuorma:

$$V_{\text{Ed.red}} := A_{\text{eff}} \cdot \sigma_{\text{gd}} \quad V_{\text{Ed.red}} = 1277.081 \text{ kN}$$

-Lävistyskartion piiri:

$$u := 2 \cdot (c_1 + c_2) + 2 \cdot \pi \cdot a$$

$$u = 4.43 \text{ m}$$

-Epäkeskisyyden vaikutus:

$$W_1 := \frac{c_1^2}{2} + c_1 \cdot c_2 + 2 \cdot c_2 \cdot a + 4 \cdot a^2 + \pi \cdot a \cdot c_1$$

$$W_1 = 2.018 \text{ m}^2$$

-Pilarin sivujen suhde:

$$cr := \frac{c_1}{c_2} = 1.25$$

$$cr = 1.25$$

-Kertoimen k arvo:

$$k_c := \begin{cases} 0.45 & \text{if } cr \leq 0.5 \\ [0.45 + (cr - 0.5) \cdot 0.3] & \text{if } 0.5 < cr \leq 1 \\ [0.6 + (cr - 1) \cdot 0.1] & \text{if } 1 < cr \leq 2 \\ [0.7 + (cr - 2) \cdot 0.1] & \text{if } 2 < cr \leq 3 \\ 0.8 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_c = 0.625$$

-Leikkausjännitys:

$$v_{Ed} := \frac{V_{Ed,red}}{u \cdot d} \cdot \left(1 + k_c \cdot \frac{M_{Ed} \cdot u}{V_{Ed,red} \cdot W_1} \right)$$

$$v_{Ed} = 0.729 \cdot \text{MPa}$$

-"Voimakertoimen" määrittämiseen tarvittava apumitta:

$$D := \sqrt{c_1 \cdot c_2}$$

$$D = 0.447 \text{ m}$$

-"Voimakerroin":

$$C_{Rdc} := \frac{0.3}{\gamma_c} \cdot \frac{\left(\frac{D}{d} + 1.5 \right)}{\frac{D}{d} + 4}$$

$$C_{Rdc} = 0.097$$

-Korkeuskerroin:

$$k := \min \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}}, 2.0 \right)$$

$$k = 1.621$$

-Tehollinen rauditusala:

-Suunta y:

-Rauditusuhde:

$$\rho_y := \frac{A_{sy,tot}}{d \cdot (6d + c_1)} \quad \boxed{\rho_y = 0.003}$$

-Ankkurointi pituus:

$$L_{b,y} := \max[0, (L_{b,y} - a)] \quad \boxed{L_{b,y} = 671.377 \cdot \text{mm}}$$

-Rauditusuhde:

$$\rho_{Ly} := \min\left(\rho_y, \rho_y \cdot \frac{L_{b,y}}{L_{bd,y}}\right) \quad \boxed{\rho_{Ly} = 0.003}$$

-Suunta z:

-Rauditusuhde:

$$\rho_z := \frac{A_{sz,tot}}{d \cdot (6d + c_2)} \quad \boxed{\rho_z = 0.002}$$

-Ankkurointi pituus:

$$L_{b,z} := \max[0, (L_{b,z} - a)] \quad \boxed{L_{b,z} = 321.377 \cdot \text{mm}}$$

-Rauditusuhde:

$$\rho_{Lz} := \min\left(\rho_z, \rho_z \cdot \frac{L_{b,z}}{L_{bd,z}}\right) \quad \boxed{\rho_{Lz} = 0.001}$$

-Pääraudoituksen rauditusuhde

$$\rho_L := \min\left(\sqrt{\rho_{Ly} \cdot \rho_{Lz}}, 0.02\right) \quad \boxed{\rho_L = 0.002}$$

-Lävistyskestävyys:

$$v_{Rd,c} := C_{Rdc} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_L \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(2 \cdot \frac{d}{a}\right) \text{MPa} \quad \boxed{v_{Rd,c} = 0.729 \cdot \text{MPa}}$$

-Mitoitusehto:

$$v_{Rd,c} \geq v_{Ed}$$

$$\text{Kestääkö antura.lävistyksen} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } v_{Rd,c} \geq v_{Ed} \\ \text{"EI KESTÄ"} & \text{if } v_{Rd,c} < v_{Ed} \end{cases}$$

$$\text{Kestääkö antura.lävistyksen} = \text{"OK"}$$

$$\text{KÄYTTÖASTE} := \frac{v_{Ed}}{v_{Rd,c}} = 0.999$$